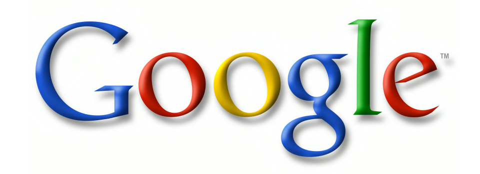
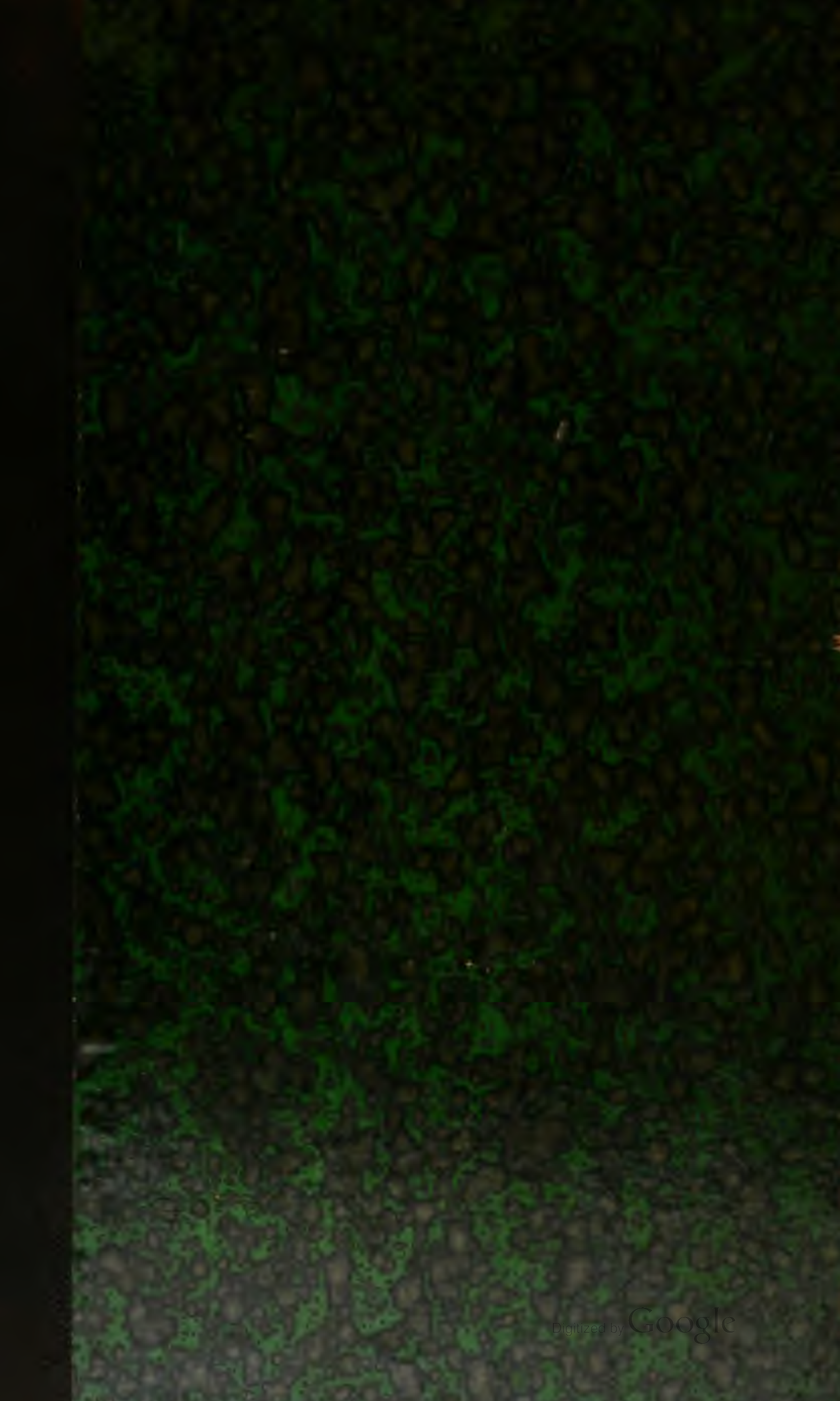
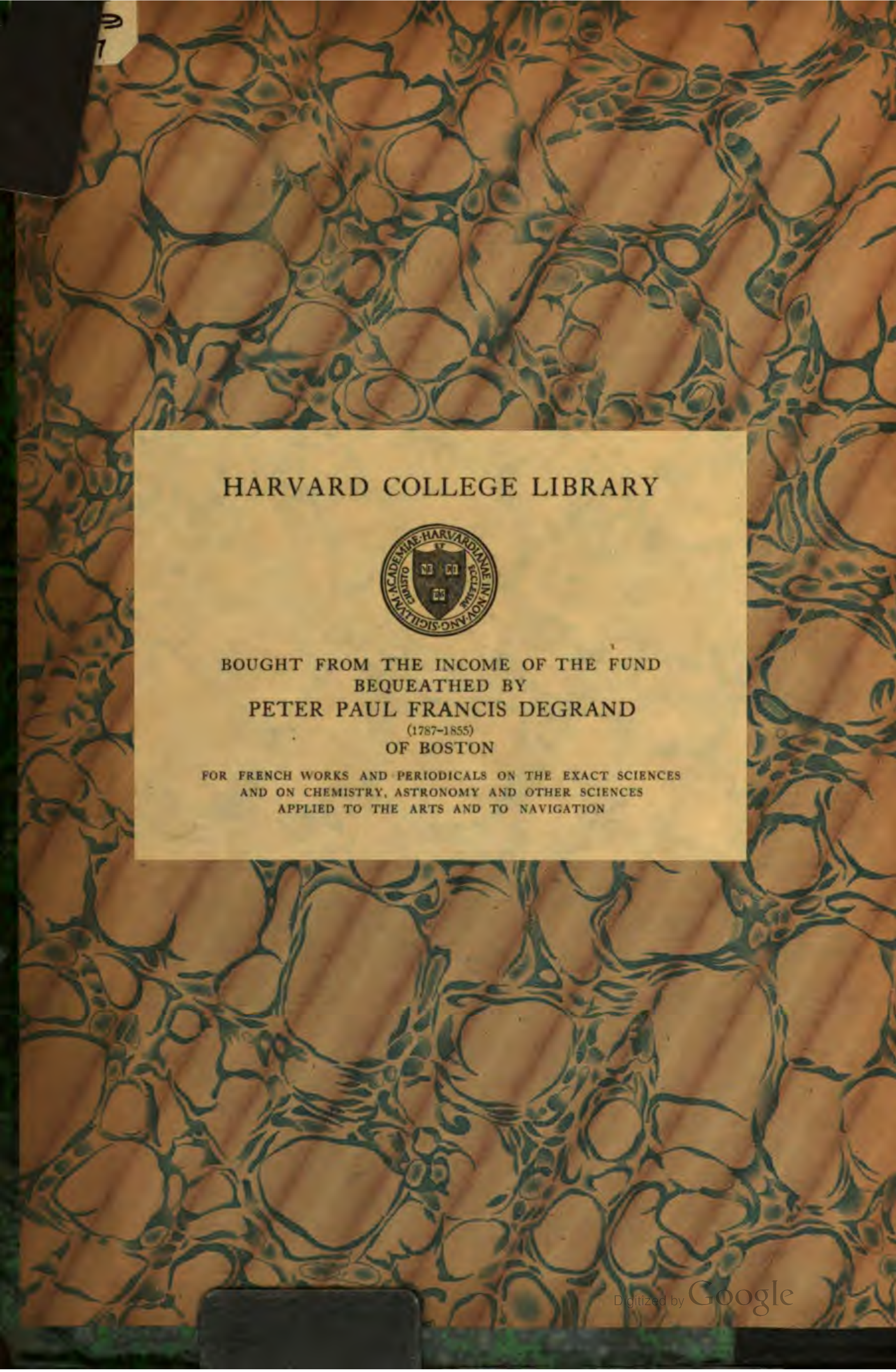





HARVARD COLLEGE LIBRARY
BOUGHT FROM THE INCOME OF THE FUND
BEQUEATHED BY
PETER PAUL FRANCIS DEGRAND
(1787-1855)
OF BOSTON
FOR FRENCH WORKS AND PERIODICALS ON THE EXACT SCIENCES
AND ON CHEMISTRY, ASTRONOMY AND OTHER SCIENCES
APPLIED TO THE ARTS AND TO NAVIGATION
Digitized by Google



PHÉNOMÈNES ET APPAREILS PRINCIPAUX

DU

COURANT ALTERNATIF

PHÉNOMÈNES FONDAMENTAUX

ET

PRINCIPALES APPLICATIONS

DU

COURANT ALTERNATIF

LOIS FONDAMENTALES DU COURANT ÉLECTRIQUE

GÉNÉRALITÉS SUR LE COURANT ALTERNATIF

ALTERNATEURS ET MOTEURS

TRANSFORMATEURS ET CONVERTISSEURS

PAR

R. SWYNGEDAUW

PROFESSEUR-ADJOINT
CHARGÉ DE L'ENSEIGNEMENT ÉLECTROTECHNIQUE
A L'UNIVERSITÉ DE LILLE

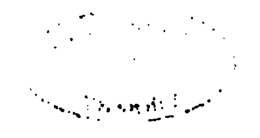
PARIS (VIe)
Vve CH. DUNOD, ÉDITEUR
49, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS

—

1904

ERRATA

Page VI, § II, 5ᵉ ligne, lire : *la puissance* au lieu de *le travail*.
Page 2, 22ᵉ ligne, lire : *et* au lieu de *de l'eau*.
23ᵉ ligne, lire : *liquide* au lieu de *fil*.
Page 3. § 4, 13ᵉ ligne, lire : *de* au lieu de *dans*
Page 55, 4ᵉ ligne, mettre pour les inductions inférieures à 5000 gauss entre parenthèses.
Page 65, 7ᵉ ligne à partir du bas, lire : *(3)* au lieu de *(1)*.
Page 74, 2ᵉ ligne à partir du bas, lire : *self-induction* au lieu de *self*.
Page 76, 2ᵉ ligne, lire : *self-induction* au lieu de *self*.
Page 80, note au bas de la page, lire : § *137* au lieu de § *128*.
Page 87, 18ᵉ ligne, lire : *circuit extérieur* au lieu de *extérieur*.
Page 107. 15ᵉ ligne, lire : 1 à 3 au lieu de 4 à 5.
Page 107, 17ᵉ ligne, lire : 0,5 à 1,5 au lieu de 2 à 3.
Page 155, 7ᵉ ligne, lire : *intérieur* au lieu de *extérieur*.



PRÉFACE

Dans le temps présent, on parle beaucoup de courant alternatif et beaucoup de personnes connaissant déjà le courant continu dans ses grandes lignes, des ingénieurs non électriciens, des étudiants désirent connaître les phénomènes fondamentaux et les principales applications du courant alternatif, sans devoir consulter des traités trop spéciaux et trop volumineux.

C'est surtout à ceux-là que s'adresse ce livre. Il est la reproduction des cours publics que j'ai faits à Lille à leur intention, et qu'un grand nombre de mes auditeurs m'ont prié de publier, et forme en même temps une fraction importante des propriétés générales des courants alternatifs étudiés en détail dans les cours d'électrotechnique de la Faculté des Sciences.

Quoique je suppose à mes lecteurs la connaissance du courant continu, j'ai cru bon de placer en tête de ces leçons une introduction sur l'énergie et un résumé d'électricité générale qui n'a pas la prétention de remplacer un traité, mais qui condense en peu de pages et sous la forme même où je les emploie, les notions fondamentales sur lesquelles je base l'étude des propriétés des courants alternatifs.

Je me suis contenté, pour ne pas dévier du but que je poursuivais, de rappeler en quelques paragraphes, à propos des commutatrices, la théorie élémentaire de la dynamo à courant

continu [1]. Je renvoie aux traités spéciaux pour une étude plus complète et notamment aux *Premiers principes d'électricité industrielle* de M. Janet [2].

Je suppose que mes lecteurs possèdent, en mathématiques et physique, le programme de mathématiques élémentaires des lycées et collèges.

Pour interpréter les phénomènes, j'ai réduit l'appareil mathématique au strict nécessaire et j'ai fait appel au nombre le plus petit possible de propositions ; c'est ainsi que je me suis efforcé d'expliquer le fonctionnement des appareils qu'on rencontre en courant alternatif, sans spécifier la forme du courant, en me basant sur la simple notion de période et sur quelques caractères généraux présentés par les courants industriels.

Par cette méthode, j'ai pu, en particulier, dans le cadre relativement élémentaire que je me suis imposé, étendre à des courants périodiques quelconques la notion si féconde de courant watté et déwatté et établir les formules fondamentales des moteurs à champ tournant sans dispersion.

J'ai évité de faire pour le courant et la tension l'hypothèse sinusoïdale, parfois si éloignée de la vérité pratique, parce que pour l'explication de la plupart des phénomènes elle n'est nullement nécessaire.

Sans doute, lorsque l'on veut connaître les valeurs numériques des grandeurs reliées par les formules générales, il est souvent nécessaire de se donner la forme du courant ; on suppose comme première approximation que le courant est sinusoïdal, ou l'on décompose l'onde fondamentale en harmoniques élémentaires suivant le théorème de Fourier. Cette étude plus approfondie

(1) La théorie de la dynamo comprend les paragraphes 73, 137 et 138.

(2) Librairie Gauthier-Villars.

est indispensable aux ingénieurs *électriciens* et forme le développement logique des généralités contenues dans ce petit livre ; mais elle n'entre pas dans le programme que je me suis tracé. C'est avec intention que je l'ai constamment écartée.

Pour atteindre le plus rapidement mon but et simplifier ma tâche, j'ai évité toute conversion d'unités électriques d'un système dans un autre et me suis servi uniquement du système pratique, sauf pour les champs magnétiques.

J'ai choisi pour l'exposé des lois de l'électricité générale les moyens les plus rapides et les plus intimement liés aux applications pratiques.

Je dois des remerciements à M. le commandant de Richard d'Abancourt, dont les notes prises au cours ont servi de point de départ à ma rédaction. Je remercie MM. L. Brunhes, ingénieur de la société électrique la Romanche, et F. Nègre, ingénieur électricien à l'Institut Electrotechnique de l'Université, de l'aide qu'ils m'ont apportée dans la revision et la correction de mes épreuves.

Lille, le 1er Décembre 1903.

INTRODUCTION

L'ÉNERGIE

I. **Travail.** — Le travail d'une force appliquée à un point matériel est le produit du déplacement de ce point par la projection de la force sur la direction du déplacement.

Le travail est *moteur* si le point se déplace dans la direction de la force ; il est *résistant* s'il se déplace en sens inverse et dans ce cas on dit que le point effectue un travail contre les forces extérieures qui le sollicitent.

La pesanteur effectue un travail moteur sur le corps qui tombe ; elle effectue un travail résistant sur un corps qui est projeté de bas en haut.

Le travail des forces appliquées à un corps est égal à la somme des travaux élémentaires des forces appliquées aux divers points du corps, les travaux moteurs et résistants étant affectés de signe contraire.

Si on évalue l'espace parcouru en mètres et la force en kilogrammes, le travail est exprimé en *kilogrammètres*; l'unité pratique de travail employée par les électriciens est le joule. Le *joule* est égal à $\frac{1}{9,81}$ kilogrammètre.

Cas particulier. — Considérons un corps soumis à un couple tournant autour d'un axe.

Soit F l'une des forces du couple dirigée suivant la tangente à

la circonférence de rayon r décrite par son point d'application. Si le corps tourne d'un angle α, le point d'application se déplace d'une longueur $R\alpha$ et le travail de la force F est $T = R F \alpha$; le travail du couple est

$$T = 2 R F \alpha$$

mais le moment du couple est $C = 2 R F$

on a donc

$$T = C \alpha$$

Le travail du couple est égal au produit du moment par le déplacement angulaire.

On évalue le moment du couple en prenant comme unités de force et de longueur le kilogramme et le mètre ; le couple est ainsi exprimé en kilogrammètres, on l'exprime en joules en multipliant le nombre de kilogrammètres par 9,81.

Les déplacements angulaires sont exprimés en prenant comme unité l'arc de longueur égale au rayon.

II. **Puissance.** — On appelle *puissance* d'une machine le travail qu'elle effectue par unité de temps. Dans la pratique on emploie beaucoup le cheval-vapeur, c'est la puissance d'un moteur capable de fournir 75 kilogrammètres par seconde.

L'unité pratique des électriciens est le *watt*, c'est le travail d'un moteur qui effectue un travail d'un joule par seconde ; un cheval-vapeur vaut 736 watts.

De l'unité de puissance, on peut déduire inversement l'unité de travail.

En effet le travail T fourni par une machine de puissance P pendant un temps t est

$$T = Pt$$

Si on évalue P en chevaux, t en heures, le travail est exprimé en cheval-heures.

Si on évalue P en watts, t en secondes, le travail est exprimé en joules.

Si P est exprimé en watts, t en heures, le travail est exprimé en watt-heures.

Dans le cas d'un corps soumis à un couple de moment C, si ω est la vitesse angulaire, le déplacement angulaire pendant le temps t est $\alpha = \omega t$ et le travail $T = C \omega t$

la puissance du couple est $P = C \omega$

Elle est égale au produit du moment par la vitesse angulaire.

III. **Force vive**. — La force vive d'un point est égale au produit mv^2 de sa masse m par le carré de sa vitesse v. La force vive W d'un corps est égale à la somme des forces vives des points matériels m, m' ... qui le composent.

$$W = mv^2 + m'v'^2 + \ldots.$$

Lorsqu'un corps garde un état physique et chimique invariable, et ne dégage pas de chaleur (§ IV), le théorème des forces vives nous apprend que la variation de la demi-force vive du corps est égale au travail des forces extérieures appliquées sur lui.

Si W_1 exprime la demi-force vive initiale, W_2 la demi-force vive finale, T le travail des forces extérieures, on a

$$(1) \qquad T = W_2 - W_1.$$

Si la force vive augmente, le travail est positif et moteur et numériquement égal à l'accroissement de la demi-force vive. Si la force vive diminue, le travail est négatif et résistant et numériquement égal à la diminution de la demi-force vive.

IV. **Quantité de chaleur**. — Lorsqu'un phénomène a pour conséquence d'élever la température d'un corps B, de fondre un corps S ou de vaporiser un corps L sous une pression constante, on dit que le *phénomène dégage* de la chaleur, et que les corps A, S, L en *absorbent* ; un fer rouge en se refroidissant est capable de chauffer un corps, de liquéfier de la glace, ou de vaporiser de

l'eau ; le refroidissement d'un corps chaud dégage de la chaleur.

Lorsqu'un phénomène a pour effet d'abaisser la température d'un corps A, de solidifier un liquide L, de liquéfier une vapeur V, sous une pression constante, on dit que le *phénomène absorbe* de la chaleur et que les corps A, L, V *en dégagent.* L'échauffement d'un corps froid absorbe de la chaleur.

La quantité de chaleur dégagée ou absorbée par un corps subissant un phénomène déterminé est une grandeur proportionnelle à la masse du corps (ce serait le cas de définir ici la chaleur spécifique, la chaleur de fusion, de vaporisation, etc., comme on le fait dans les traités classiques). La quantité de chaleur dégagée par un phénomène est par définition égale à la quantité de chaleur absorbée par les corps influencés par lui (par rayonnement, par contact, et par conductibilité) ; il faudra donc toujours distinguer entre chaleur dégagée par un phénomène et chaleur dégagée par un corps.

L'unité de quantité de chaleur est la *grande calorie* ou quantité de chaleur nécessaire pour faire varier la température d'une masse d'un kilogramme d'eau distillée de 1 degré centigrade sous la pression normale, ou la petite *calorie* qui est la quantité de chaleur nécessaire pour faire varier la température de 1 gramme d'eau distillée de 1 degré centigrade sous la pression normale.

V. **Équivalence de la chaleur et du travail.** — L'observation montre que l'on peut *créer* de la chaleur par le frottement, et en *détruire* par la machine à vapeur. Cette création ou cette destruction de chaleur est accompagnée de travail moteur ou résistant.

Considérons un corps qui subit des *phénomènes* physiques ou chimiques, tels que son état *final* soit identique à son état *initial* ; si le travail des forces extérieures qui se sont exercées

sur lui est *moteur*, le phénomène subi par le corps *dégage* une quantité de chaleur proportionnelle au travail effectué ; si le travail des forces qui se sont exercées sur lui est *résistant*, le phénomène *absorbe* une quantité de chaleur proportionnelle au travail effectué par le corps.

Si on prend les mêmes unités pour mesurer le travail moteur ou résistant et les mêmes unités pour évaluer la quantité de chaleur absorbée ou dégagée, on a dans les deux cas

$$(2) \qquad T = EQ$$

Le coefficient de proportionnalité E s'appelle l'*équivalent mécanique de la chaleur*. Le produit E Q s'appelle le travail équivalent de la quantité de chaleur dégagée ou absorbée. Un travail moteur des forces extérieures est équivalent à une quantité de chaleur dégagée. Un travail résistant est équivalent à une quantité de chaleur absorbée.

La formule $T = EQ$ est générale si on considère comme positifs un travail moteur et une quantité de chaleur dégagée, comme négatifs un travail résistant et une quantité de chaleur absorbée. Si T est évalué en kilogrammètres, Q en grandes calories, $E = 427$.

Si T est évalué en joules, Q en petites calories, $E = 4{,}185$.

Une grande calorie équivaut à 427 kilogrammètres.

Une petite calorie équivaut à 4,185 joules.

VI. **Énergie interne ou potentielle.** — Lorsqu'un corps change de force vive en même temps qu'il subit des modifications qui le ramènent finalement à son état initial, on a

$$(3) \qquad T = EQ + W_2 - W_1$$

W_1 et W_2 représentent respectivement les demi-forces vives initiale et finale du corps, Q la quantité de chaleur dégagée *par le phénomène* subi par le corps.

Lorsque l'état final du corps est différent de son état initial,



l'égalité (3) n'est pas vérifiée. Pour la rétablir il faut ajouter un terme dans le second membre. Suivant que ce terme est positif ou négatif, on l'appelle *accroissement* ou *diminution d'énergie interne*, potentielle ou chimique du corps. Ce terme dépend uniquement des états initial et final du corps, et nullement de la série des modifications successives par lesquelles le corps a passé ; on peut le représenter par la différence $U_2 - U_1$; U_1 dépendant uniquement de l'état initial et U_2 uniquement de l'état final sont appelées énergie interne, potentielle ou chimique dans l'état initial et final.

L'égalité (3) rectifiée devient ainsi

$$(4) \qquad T = EQ + W_2 - W_1 + U_2 - U_1$$

où Q exprime toujours la quantité de chaleur dégagée par les phénomènes présentés par le corps considéré, c'est-à-dire la chaleur absorbée par les corps environnants influencés par lui.

Cette égalité entièrement générale est applicable à tous les phénomènes de la nature et à chaque instant, pourvu qu'on fasse la convention de signes du § V, sur le travail et la quantité de chaleur ; elle exprime le principe de l'équivalence généralisé.

VII. **Énergie.** — On a été conduit à supposer que les changements d'état, de température, de force vive des corps sont dus à une même cause, l'*énergie*.

Un accroissement ou une diminution de force vive est dû à un accroissement ou une diminution d'énergie sous la forme *cinétique*, égale numériquement à la variation de force vive.

L'absorption ou le dégagement de chaleur par un corps est dû à une augmentation ou une diminution d'énergie sous la forme *calorifique*, numériquement égale au travail équivalent à la quantité de chaleur absorbée ou dégagée.

Un changement d'état est corrélatif d'une augmentation ou

d'une diminution d'énergie du corps sous forme *potentielle* ou *chimique*.

Les mots *augmentation, gain, absorption* d'énergie sont synonymes; les mots *diminution, perte, dégagement* d'énergie sont synonymes. La variation de l'*énergie totale* ou de l'*énergie*, sans épithète, d'un corps est la somme algébrique des accroissements d'énergie cinétique, calorifique et potentielle ou chimique. L'énergie totale augmente si cette somme est positive; elle diminue si elle est négative.

Un phénomène *dégage* ou *absorbe* de l'énergie suivant qu'il a pour effet d'augmenter ou de diminuer l'énergie totale des corps qu'il influence.

La *puissance absorbée* ou *dégagée* par un phénomène est égale à l'énergie que ce dernier absorbe ou dégage par unité de temps.

VIII. **Mesure mécanique de l'énergie.** — Toute diminution d'énergie d'un corps est équivalente à un travail résistant effectué contre les forces extérieures par le corps. Toute augmentation d'énergie du corps équivaut à un travail moteur effectué par les forces extérieures sur le corps.

D'après le principe des forces vives, si l'énergie cinétique d'un corps diminue sans qu'il change d'état et sans que le phénomène qu'il présente dégage ou absorbe de chaleur, c'est qu'il effectue un travail résistant contre les forces extérieures égal à la diminution de force vive; c'est le cas d'un corps pesant projeté de bas en haut. D'après le principe de l'équivalence, si le phénomène présenté par un corps absorbe de l'énergie calorifique sans changement d'état ni de force vive, c'est que le corps effectue contre les forces extérieures un travail résistant égal à l'énergie calorifique absorbée; c'est le cas de la vapeur qui travaille sous le piston d'une machine à vapeur.

D'après le principe de l'équivalence généralisé, une diminution d'énergie interne d'un corps, sans que le phénomène présenté par ce dernier ne dégage ni absorbe de chaleur, et sans travail extérieur, est égale et de signe contraire à l'accroissement de force vive du corps ; ce qui nous ramène à un cas traité. C'est sensiblement le cas d'un coup de canon avec détente complète.

L'énergie d'un corps peut donc être définie comme étant *sa capacité de produire du travail résistant* : elle est numériquement égale au travail résistant que le corps peut effectuer contre les forces extérieures.

Si un corps effectue un travail résistant, il *perd de l'énergie* ; il *dégage*, *crée* ou *produit* de l'énergie *mécanique* égale au travail résistant effectué. Lorsque les forces extérieures appliquées à un corps effectuent un travail moteur, on dit qu'il absorbe de l'*énergie mécanique* numériquement égale au travail moteur.

L'énergie et la puissance se mesurent par conséquent avec les mêmes unités que le travail et la puissance mécaniques.

IX. **Transformations de l'énergie.** — Les phénomènes présentés par les corps sont corrélatifs de transformations de l'énergie d'une forme dans une autre. Ainsi dans un coup de fusil l'énergie interne de la poudre se convertit en énergie cinétique communiquée à la balle : cette dernière se transforme au moment du choc en énergie calorifique et en énergie interne changeant l'état du corps qu'elle frappe.

Dans la machine à vapeur, l'énergie potentielle du mélange charbon et oxygène se convertit en énergie calorifique qui se transforme partiellement en travail, c'est-à-dire en énergie mécanique ; mais ce travail lui-même provoque un changement d'énergie interne, cinétique et calorifique des corps actionnés par la machine.

En résumé, lorsque les corps se transforment, il y a simplement échange et transformation d'une énergie d'une forme dans l'autre.

Nous verrons que le courant électrique se présente dans certains phénomènes, comme une forme passagère et intermédiaire de l'énergie, quand une forme utilisable, calorifique, chimique ou mécanique de l'énergie se convertit en une autre.

X. **Conservation de l'énergie.** — Les échanges d'énergie sont régis par un principe fondamental, le principe de la conservation de l'énergie. *Lorsqu'un corps se transforme, l'augmentation de son énergie est égale à la diminution de l'énergie de tous les autres corps de l'univers.* Ce principe n'est qu'une forme généralisée du principe de l'équivalence (4).

Nous admettrons que deux corps ne peuvent exercer de forces l'un sur l'autre que par contact immédiat. Les actions à distance, introduites par Newton, ne sont que les résultantes des actions qui s'exercent de proche en proche, par l'intermédiaire de milieux pondérables ou non.

Divisons l'univers en deux régions, l'une A remplie par le corps considéré, l'autre A' remplie par tous les autres corps ; les seules forces qui s'exercent entre A et A' sont des tractions ou des pressions sur la surface de séparation des deux régions.

Si A exerce sur A' une pression dirigée de A vers A', inversement A' exerce sur A une pression égale et directement opposée [1]. Si donc le travail des forces extérieures exercé par A sur A' est moteur, celui de A' sur A est résistant, et réciproquement. Si l'un est positif, l'autre est égal en valeur absolue mais négatif.

Dans ces conditions, le travail de A' sur A a pour effet d'ac-

[1] Aux infiniment petits près.

croître l'énergie calorifique de A' du travail équivalent à la chaleur $Q^{A'}$ dégagée par les phénomènes que présente A, chaleur qui est absorbée par A'. Si W_1, W_2, U_1, U_2, sont les énergies cinétique et interne du corps A dans les états 1 et 2, on a

(5) Travail de A sur A' $= EQ_{A'} + W_2 - W_1 + U_2 - U_1$

Si on considère de même le travail de A sur A', en appelant EQ_A l'énergie calorifique dégagée par les corps A' et absorbée par A, W'_1, W'_2, U'_1, U'_2, les énergies cinétique et interne des corps A dans les états 1 et 2, on a

(6) Travail de A' sur A $= EQ_A + W'_2 - W'_1 + U'_2 - U'_1$

Si nous ajoutons membre à membre ces deux égalités, les premiers membres étant égaux et de signe contraire, on a en groupant les termes du second

$$o = (EQ_A + W_2 - W_1 + U_2 - U_1) + (EQ_{A'} + W'_2 - W'_1 + U'_2 - U'_1)$$

La première parenthèse représente l'énergie totale du corps A ; la deuxième, l'énergie totale des corps A'; dans le phénomène considéré, l'augmentation de l'énergie totale de l'univers est nulle; l'énergie perdue par un corps A a été gagnée par les autres corps A' de l'univers et réciproquement ; l'énergie de l'univers est constante.

Au point de vue pratique, pour évaluer les pertes d'énergie d'un corps, il suffit, en général, d'évaluer les augmentations d'énergie des corps ambiants qui sont les seuls sur lesquels le corps exerce un effet sensible.

XI. **Rendement d'une transformation**. — Les *machines* transforment une énergie d'une forme en une énergie plus *utile* d'une autre forme.

On appelle *rendement*, le rapport de l'énergie utile recueillie W_u à l'énergie totale W_T fournie à la machine

$$\text{rendement} = \frac{W_u}{W_T}$$

Le rendement ne peut jamais être supérieur à l'unité d'après le principe de la conservation de l'énergie ; mais il peut lui être égal ou inférieur. Le rendement n'atteint une valeur égale à l'unité que dans les transformations d'une énergie d'une forme quelconque en énergie calorifique.

Si la forme de l'énergie que l'on veut produire n'est pas calorifique, le rendement n'est jamais égal à l'unité.

Cette proposition n'est pas contraire au principe de la conservation de l'énergie, car en même temps que nous produisons l'énergie sous la forme utile, il se dégage une autre énergie que nous ne voulons pas produire, mais qui prend naissance spontanément par la nature même des phénomènes. C'est ainsi notamment que, dans toute transformation, il se produit en général de l'énergie calorifique.

Pour ne pas sortir de la mécanique, dans toutes les machines il se dégage de la chaleur par les frottements et autres résistances passives.

On aura d'autres exemples en électricité [1].

XII. **Système pratique d'unités électriques**. — Les grandeurs électriques sont reliées aux grandeurs géométriques et mécaniques (longueur, masse, temps, travail, etc.) par des définitions et des lois exprimées par des formules algébriques.

En choisissant convenablement les définitions et les unités des grandeurs électriques, on peut exprimer chacune d'elles en fonc-

[1] Ces considérations de rendement ont été très fécondes en thermodynamique, où elles ont conduit au principe de Carnot ; nous ne pouvons les examiner ici.

Disons seulement qu'elles ont conduit à faire une distinction entre les diverses espèces d'énergie au point de vue de leur aptitude à se transformer. Le principe suivant en a été déduit.

Les transformations de l'énergie sont telles que la partie transformable de l'énergie de l'univers diminue constamment. L'univers tend vers un état de repos absolu.

tion de valeurs numériques de longueurs, de masses et de temps.

On forme ainsi un système absolu d'unités électromagnétiques.

Si on exprime les longueurs en centimètres, les masses en grammes et le temps en secondes, on obtient un système d'unités C. G. S.

Les unités électromagnétiques C. G. S. sont en général beaucoup trop grandes ou trop petites pour les grandeurs que l'on a à mesurer en pratique. On obtient un *système* électromagnétique *pratique* pour les électriciens en prenant comme unité de longueur le quadrant, c'est-à-dire 10^9 centimètres, comme unité de masse $\frac{1}{10^{11}}$ gramme, et comme unité de temps la seconde ; c'est le système d'unités dont nous nous servirons dans cet ouvrage ; toutes ces unités ou leurs multiples (de l'ordre de 10^3 ou 10^6) [1] ou leur sous-multiple (de l'ordre $\frac{1}{10^6}$) [2] sont des grandeurs de l'ordre de celles que l'on rencontre dans la pratique industrielle [3].

[1] On les dénomme en faisant précéder le nom de l'unité, des préfixes kilo pour 10^3, méga pour 10^6.

[2] On le dénomme en faisant précéder le nom de l'unité, du préfixe micro.

[3] Pour les grandeurs magnétiques, le champ magnétique par exemple, le système dit pratique donne des unités d'un ordre de grandeur disproportionné avec celles que l'on rencontre en pratique, on lui préfère le système C. G. S.

PREMIÈRE PARTIE

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES COURANTS

CHAPITRE I

PHÉNOMÈNES FONDAMENTAUX DU COURANT ÉLECTRIQUE INTENSITÉ, RÉSISTANCE

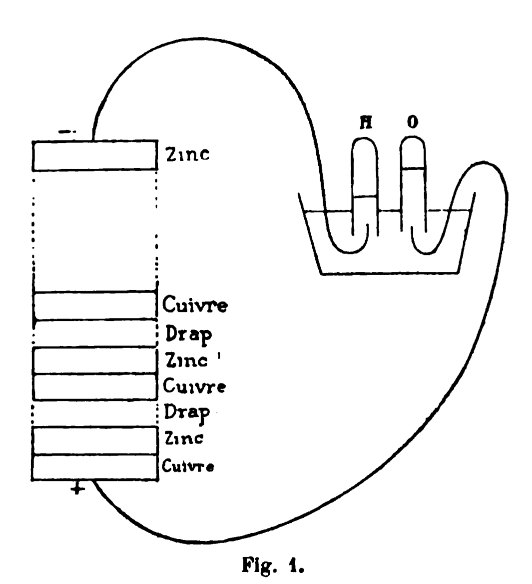


Fig. 1.

1. Pile de Volta. — En 1800, Volta fit l'empilement suivant (fig. 1) : Sur un disque de cuivre, il plaça un disque de zinc, puis une rondelle de drap mouillée par de l'acide sulfurique étendu d'eau, puis un disque de cuivre, un disque de zinc, une rondelle de drap, et ainsi de suite.

Il termina cette colonne par un disque de zinc et il lui donna le nom de *pile*.

On découvrit bientôt que cette pile produisait des phéno-

mènes nouveaux qui caractérisent ce que l'on appelle le *courant électrique*.

2. Phénomènes fondamentaux du courant. — Si l'on réunit les extrémités ou *pôles* de la pile de Volta par un fil métallique, ce fil présente les propriétés suivantes :

1° Il s'échauffe et peut devenir incandescent dans ses parties les plus minces ;

2° Il dévie une boussole, c'est-à-dire une aiguille aimantée mobile sur un pivot, placée dans son voisinage ;

3° Si l'on coupe le fil en un point, une étincelle jaillit entre les portions coupées que l'on écarte et les deux phénomènes précédents cessent.

Ces trois caractères définissent le courant dans un fil. Toutes les fois qu'un fil s'échauffe et devient *en même temps* capable de dévier une boussole, on dit que le fil est parcouru par un *courant* et dans ce cas sa rupture en un point provoque une étincelle inévitable : l'*étincelle de rupture*.

4° Si l'on plonge les extrémités coupées du fil dans un vase contenant de l'eau acidulée, on constate, si le liquide est parcouru par un courant, que l'eau est décomposée en ses éléments : oxygène et hydrogène (fig. 1) ;

Ces trois phénomènes : décomposition de l'eau, échauffement du fil, déviation de l'aiguille aimantée, caractérisent le courant dans un liquide composé, ils sont corrélatifs l'un de l'autre. Si l'un est supprimé, tous sont supprimés ; si l'un existe, tous existent.

3. Circuit ouvert et fermé. — Si l'on peut passer d'une extrémité de la pile à l'autre par un circuit *extérieur* entièrement métallique ou formé d'une solution acide ou d'un composé métallique, on dit que *le circuit de la pile est fermé;* on constate les phénomènes décrits plus haut : *le courant passe.*

Les métaux et les solutions métalliques ou acides sont dits *conducteurs* de l'électricité.

Si le circuit conducteur extérieur de la pile est coupé, de façon à présenter un intervalle d'air entre ses extrémités, *le circuit est dit ouvert;* on ne constate pas les phénomènes décrits : *le courant ne passe pas.*

Un intervalle de mica, d'ébonite, d'huile ou de paraffine produit le même effet; l'air, le mica, l'ébonite, l'huile, la paraffine sont des *isolants* électriques.

4. Sens du courant. Électrolyse. — Le phénomène du courant est un phénomène dirigé. Si l'on plonge dans l'eau ordinaire ou acidulée les bouts libres de deux fils attachés aux extrémités de la pile, l'un se recouvre uniquement d'hydrogène, l'autre uniquement d'oxygène qui attaque le métal s'il est oxydable comme le cuivre.

En général si l'on plonge les extrémités dans une solution métallique quelconque, du sulfate de cuivre, par exemple, le métal, le cuivre, se dépose uniquement sur l'une, le radical uni au métal exclusivement sur l'autre ; les deux fils n'ont pas la même propriété; on dit que le phénomène est dirigé.

Par convention, le sens du courant est le sens suivant lequel le métal est entraîné dans la solution sur le fil qui le reçoit.

La décomposition d'un liquide par un courant s'appelle *électrolyse*; le liquide qui subit la décomposition s'appelle *électrolyte* ; le vase où s'effectue la décomposition s'appelle *voltamètre* ou *électrolyseur* ; les fils qui plongent dans la solution portent le nom d'*électrodes* ; l'électrode qui se recouvre de métal s'appelle électrode *négative* ou *cathode;* celle qui se recouvre du métalloïde est dite électrode *positive* ou *anode.*

Le *pôle positif* ou le *pôle négatif* de la pile sont les extrémités de



la pile en communication métallique directe avec l'électrode positive ou l'électrode négative du voltamètre ([1]).

Moyennant ces définitions, on peut dire qu'*à l'extérieur de la pile le courant va du pôle positif au pôle négatif.*

L'expérience montre que le courant existe aussi à l'intérieur de la pile ; l'eau acidulée des rondelles de la pile de Volta est décomposée, mais l'hydrogène se dégage au pôle positif et l'oxygène au pôle négatif.

D'après notre convention, on peut donc dire qu'*à l'intérieur de la pile* il se produit également *un courant* mais *dirigé du pôle négatif au pôle positif.*

Le phénomène du dégagement de chaleur n'est pas dirigé ; le fil s'échauffe quel que soit le sens du courant.

Le phénomène de la déviation de l'aiguille aimantée dépend du sens du courant ; si l'on change ce sens dans le fil conducteur, la déviation de l'aiguille change aussi de sens.

Ampère a montré que l'extrémité de l'aiguille qui se dirige vers le nord, ou son pôle nord, se porte toujours à la gauche d'un obvervateur, qui regarde ce pôle en nageant dans le courant, de façon que ce dernier lui entre par les pieds et lui sorte par la tête.

5. Constitution d'une pile. — La pile de Volta a reçu de nombreuses modifications ; un vase contenant une dissolution aqueuse d'un composé métallique ou d'un acide, dans laquelle plongent deux conducteurs de nature différente pouvant réagir chimiquement sur la dissolution, constitue une pile ; les deux conducteurs sont les pôles de la pile. Lorsqu'on les réunit par un fil métallique, ce dernier est parcouru par un courant.

([1]) L'expérience relatée au début du paragraphe 4 est une façon pratique de reconnaître le signe des pôles d'une source d'électricité ; si l'on plonge deux fils réunis aux pôles dans un verre d'eau ordinaire, le pôle négatif est le fil sur lequel se dégagent des bulles.



6. Intensité du courant. — Deux courants ne sont pas en général susceptibles de décomposer les mêmes quantités d'un même électrolyte dans le même temps; on dit que ces deux courants n'ontpas la même intensité.

On dit que deux courants ont la même intensité quand ils décomposent la même masse du même composé dans le même temps.

Un courant a une intensité deux, trois... fois plus grande qu'un autre s'il décompose une masse deux, trois... fois plus grande que cet autre dans le même temps.

L'intensité d'un courant est une grandeur proportionnelle à la masse d'électrolyte décomposée dans un temps donné.

L'unité pratique d'intensité s'appelle l'*ampère*. *L'ampère est l'intensité d'un courant capable de déposer 0 gr. 000326 de cuivre par seconde sur l'électrode négative d'un voltamètre contenant une dissolution de sulfate de cuivre.* Un courant de 2,3, i ampères est capable de déposer dans le même voltamètre, sur l'électrode négative, un poids de 2,3, i fois 0 gr. 000326 de cuivre par seconde.

Industriellement, on mesure la valeur d'un courant en ampères par ce procédé. Soit P grammes la masse de cuivre déposée par un courant de i ampères pendant le temps t secondes, on a :

$$P = 0{,}000326 \times it.$$

d'où

$$i = \frac{P}{0{,}000326 \times t} \text{ ampères}$$

7. Quantité d'Électricité. — Le produit it de l'intensité du courant par le temps t qu'il a duré, s'appelle la quantité q d'électricité transportée par le courant pendant le temps t.

$$(1) \qquad q = it$$

Pratiquement, on évalue i en ampères et t en secondes, ou en

heures ; dans le premier cas q est exprimé en *coulombs*, dans le second en ampère-heures.

Le coulomb est l'unité du système pratique ; c'est la quantité d'électricité transportée par un ampère en une seconde.

8. Analogies hydrauliques. — Cette dénomination de quantité d'électricité provient du fait suivant :

Pour se représenter le courant, les anciens physiciens imaginaient que l'électricité était un fluide qui se déplaçait dans le circuit de la pile du pôle positif au pôle négatif à l'extérieur de la pile. Le circuit de la pile serait ainsi analogue à un circuit formé d'un tuyau fermé sur lui-même rempli de liquide et contenant une pompe qui ferait circuler constamment le liquide dans un sens déterminé, celui de la flèche par exemple (fig. 2). La pile remplacerait la pompe pour le circuit électrique ; ce serait l'énergie chimique qui fournirait l'énergie électrique manifestée par le courant.

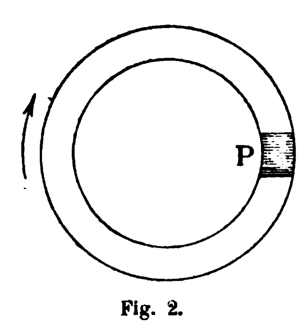


Fig. 2.

Si le tuyau est rigide, une section quelconque est traversée par la même quantité de liquide dans le même temps, il en est de même pour le circuit électrique. Si, dans un circuit fermé, on intercale des voltamètres contenant un même électrolyte en divers points, le poids d'électrolyte décomposé est le même dans chacun d'eux ; nous disons donc que *le courant a la même intensité dans chaque section de son circuit.*

9. Courants dérivés (Lemme de Kirchoff). — Si le tuyau hydraulique se bifurque en tuyaux dérivés qui se rejoignent, la quantité de liquide qui arrive dans un temps donné au point de

bifurcation est la même que celle qui s'en éloigne dans le même temps. De même (fig. 3) *si un conducteur se bifurque en A en plusieurs conducteurs dérivés qui se rejoignent en B, l'intensité du courant qui arrive au point de bifurcation est égale à la somme des intensités des courants qui s'en éloignent;* on le démontre en plaçant des voltamètres sur les dérivations et sur le circuit principal. Il en est de même pour le point de jonction tant des tuyaux hydrauliques que des conducteurs électriques.

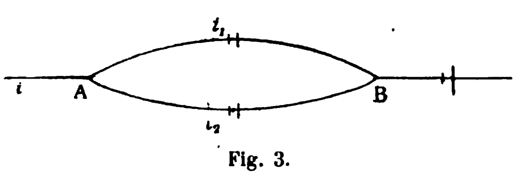


Fig. 3.

10. Loi de Joule. — Un courant échauffe le conducteur qu'il parcourt. Joule a mesuré la quantité de chaleur dégagée en plaçant un fil conducteur dans un calorimètre et en mesurant l'intensité du courant. Il a trouvé les deux lois suivantes :

1° *La chaleur dégagée dans un fil conducteur homogène* (¹) *pendant un temps donné est proportionnelle au carré de l'intensité du courant.*

Si un courant d'un ampère est capable d'élever la température de l'eau d'un calorimètre de 1° en dix minutes par exemple, un courant de deux ampères, c'est-à-dire déposant deux fois autant de métal pendant le même temps dans le voltamètre à sulfate de cuivre, produit dans le même calorimètre et pendant le même temps, une élévation de température de 4°, c'est-à-dire une quantité de chaleur 4 fois plus grande.

2° *La chaleur dégagée dans un fil pendant un temps donné dépend de la nature du fil traversé par le courant et de sa température ; elle est proportionnelle à sa longueur et inversement proportionnelle à sa section.*

(¹) Si le fil n'est pas homogène, il se produit à la surface de contact des parties hétérogènes un dégagement ou une absorption de chaleur suivant le sens du courant; ce phénomène dit *effet Peltier* est négligeable industriellement, devant l'effet Joule.

Des fils de même longueur et de même section ne sont pas également échauffés par un même courant : le cuivre et l'argent s'échauffent moins que le fer, le fer moins que le maillechort, le maillechort moins que le mercure. Si dans un fil de cuivre on a un dégagement de chaleur de 1 calorie, on a dans le même temps les dégagements de chaleur suivants, dans un fil de mêmes dimensions de la nature suivante : 6 calories, s'il est en fer ; 13, s'il est en maillechort ; et 80, si c'est une colonne de mercure.

De deux fils de mêmes nature et dimensions traversés par le même courant, celui dont la température est la plus élevée dégage le plus de chaleur.

Dans deux mètres d'un fil donné, on a deux fois autant de chaleur dégagée que dans un mètre.

Dans un fil de cuivre de 2 mm. de diamètre, il y a 4 fois moins de chaleur dégagée que dans un fil de mêmes nature et longueur de 1 mm. de diamètre, la section étant devenue 4 fois moindre.

11. Résistance. Expression de l'énergie dégagée. — Pour exprimer la loi de Joule remplaçons la quantité de chaleur dégagée par la puissance calorifique équivalente ; si l'on désigne par ρ la puissance calorifique dégagée par un courant d'intensité égale à l'unité, dans un fil ayant une longueur égale à l'unité et une section égale à l'unité, la puissance calorifique dégagée par le même courant dans un fil de longueur l et de section s est d'après la deuxième loi de Joule :

$$(2) \quad r = \rho \frac{l}{s}$$

La quantité r s'appelle la *résistance du fil*, le coefficient ρ la *résistance spécifique ou résistivité* du métal. *La résistance d'un fil est une grandeur proportionnelle à sa résistivité, à sa longueur, et inversement proportionnelle à sa section.*

La résistivité d'un métal croît quand sa température s'élève.

On écrit quelquefois

$$(3) \quad r = \frac{l}{c\,s};$$

c s'appelle la *conductibilité spécifique du conducteur.*

La résistance d'un circuit est égale à la somme arithmétique des résistances de chacun des segments dont il se compose.

Si l'on prend respectivement comme unités de temps, d'intensité et de puissance la seconde, l'ampère et le watt (introduction § II), la résistance est mesurée en *ohms.*

L'*Ohm* est l'unité pratique de résistance, *c'est la résistance d'un fil homogène dans lequel un courant d'un ampère dégage une puissance calorifique d'un watt.* Une colonne de mercure de 106 cm. 3 de longueur et de 1 mmq. de section à 0°, a une résistance d'un ohm.

Un courant de *i* ampères dégage en *t* secondes, dans un fil d'une résistance de *r* ohms, un nombre *w* de joules (introduction § I) donné par la formule :

$$(4) \quad w = ri^2t$$

Ainsi un fil de 2 ohms de résistance, parcouru par un courant de 10 ampères pendant 10 secondes, dégage : $2 \times 10^2 \times 10$ ou 2000 joules.

Or, le joule équivalant à $\frac{1}{4,18} = 0,24$ petite calorie, le nombre de petites calories dégagées dans le fil en question est de $\frac{2000}{4,18} = 2000 \times 0,24 = 480$ petites calories.

12. Mesure de l'intensité. — Ampèremètre. — Les appareils qui indiquent directement le courant en ampères s'appellent des *ampèremètres.* On construit des ampèremètres *thermiques* fondés sur le dégagement de chaleur par les courants ; nous décrirons celui de Hartmann et Braun.

On fait passer le courant dont on veut mesurer l'intensité dans une barre métallique sur laquelle on tend un fil métallique très

fin entre deux points A et B fixes (fig. 4) : au milieu D de ce fil en est attaché un autre également très fin dont l'autre extrémité est fixée en un point C. Du milieu environ E de ce second fil en part un troisième qui s'enroule sur une poulie *p* et dont l'autre extrémité est fixée à un ressort *r*.

Lorsque le courant passe, le fil AB s'échauffe, s'allonge et par suite s'infléchit ; il prend la position AD'B et le fil flexible DC prend la position D'E'C ; le fil E*r* tiré par le ressort prend une position nouvelle E'*r* et fait tourner la poulie P qui entraîne avec elle une aiguille *a* mobile devant un cadran gradué.

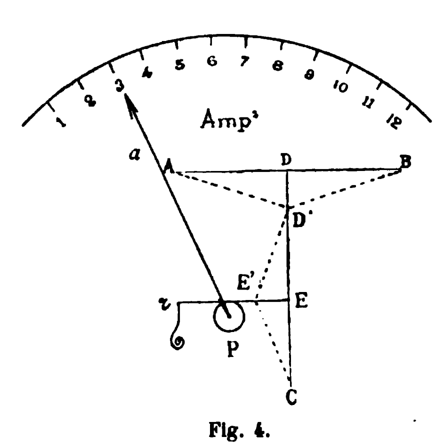


Fig. 4.

A un courant déterminé dans la barre correspond une puissance calorifique dégagée, déterminée, dans le fil AB.

Le fil s'échauffe ; à mesure que sa température s'élève, il s'allonge et rayonne de plus en plus de chaleur ; au bout de quelques secondes, la température du fil est telle que la puissance calorifique dégagée par le courant est perdue totalement par rayonnement ; la température du fil reste stationnaire ; sa longueur ne change plus. Pour un courant plus fort, le fil dégage plus de chaleur ; sa température s'élève et devient de nouveau stationnaire, le fil s'est allongé davantage. A un courant donné dans le fil, correspond une longueur déterminée de ce dernier, et par suite une position déterminée de l'aiguille sur le cadran.

Si on intercale l'ampèremètre dans un circuit contenant une pile et un voltamètre, on pourra par l'électrolyse connaître l'intensité

du courant qui passe (§ 6) et noter, en face de la division où s'arrête l'aiguille de l'ampèremètre, le nombre d'ampères contenus dans le courant qui produit cette déviation. En faisant cette opération pour toutes les divisions du cadran, avec des courants d'intensité différente, on aura gradué l'ampèremètre. Il suffira alors d'introduire un ampèremètre gradué dans un circuit quelconque, pour lire immédiatement l'intensité du courant qui parcourt le circuit.

CHAPITRE II

FORCE ÉLECTROMOTRICE. TENSION. CAPACITÉ

13. Énergie d'un courant. — Un courant se manifeste par un dégagement (§ 10) ou une absorption (§ 8) d'énergie utilisable (mécanique, calorifique, chimique), dans le conducteur qu'il parcourt et le milieu qui l'entoure (Voir chap. III et IV).

D'après le principe de la conservation de l'énergie (§ X), ce qu'un conducteur parcouru par un courant et le milieu influencé par lui perdent en énergie utilisable, est absorbé par le courant sous forme d'*énergie électrique*. De même ce que le courant perd en énergie électrique est absorbé sous forme d'énergie utilisable, par le conducteur qu'il parcourt et le milieu qu'il influence.

Si on ne considère que le résultat sensible du passage du courant, l'énergie utilisable perdue par les milieux environnant un segment de circuit est gagnée par les milieux environnant le reste du circuit; ainsi, l'énergie chimique perdue à l'intérieur de la pile est récupérée sous forme calorifique, chimique ou mécanique, sur le reste du circuit. Le courant est l'agent insensible qui *transporte* l'énergie d'un endroit à un autre.

14. Générateurs et récepteurs. — Supposons que l'on puisse diviser, par la pensée, le circuit du courant en segments tels que AB échangeant de l'énergie uniquement avec certains corps G, et BC échangeant de l'énergie uniquement avec d'autres corps R différents des premiers.

Lorsque dans un segment de circuit et dans le milieu influencé par lui, l'énergie utilisable augmente, le *courant dégage de l'énergie* ; on convient de dire que le segment contient un *récepteur électrique*. Un fil homogène parcouru par un courant dégage de la puissance calorifique. C'est un récepteur calorifique.

Si le courant dégage de la puissance chimique ou mécanique, le segment renferme un récepteur chimique ou mécanique.

Lorsque, dans un segment de circuit et dans le milieu influencé par lui, l'énergie utilisable diminue, le courant *absorbe de l'énergie* ; on convient de dire que le circuit contient un *générateur d'électricité*.

L'effet joule peut masquer la présence d'un générateur.

On dira que le segment contient un *générateur d'électricité*, si la puissance utilisable P dégagée par le courant i dans un segment de résistance r est plus petite que l'effet joule, c'est-à-dire si

$$P = ri^2 - A$$

A étant une quantité positive. Si la puissance utilisable perdue par les corps extérieurs est mécanique, chimique ou thermique, on a un générateur mécanique, chimique ou thermique.

15. Force électromotrice et contrélectromotrice. — Mais en général la puissance absorbée dans le générateur est plus grande que la puissance dégagée ; la puissance absorbée peut s'écrire

$$P_a = A - ri^2$$

si nous posons $A = ei$, il vient $P_a = ei - ri^2$: e s'appelle *la force électromotrice du générateur*.

Si on fait abstraction de l'effet joule, la puissance utilisable absorbée dans le générateur (y compris le milieu influencé) est égale au produit de la force électromotrice par l'intensité du courant.

La force électromotrice d'un générateur est numériquement égale à la puissance utilisable qu'il absorbe par unité de courant dans son circuit. Cette puissance est transformée en puissance électrique.

Si cette puissance est exprimée en watts et le courant en ampères, la force électromotrice est exprimée en *volts. Le volt* est l'unité pratique de force électromotrice, *c'est la force électromotrice d'un générateur, dans lequel un ampère transforme en puissance électrique une puissance utilisable d'un watt.*

Si nous considérons un récepteur quelconque, la puissance totale dégagée par le circuit est

$$P = ri^2 + B$$

si on pose

$$B = e'i$$

$$P = ri^2 + e'i$$

e' s'appelle la force contrélectromotrice du récepteur; *en faisant abstraction de l'effet joule, la puissance utilisable dégagée dans le récepteur et dans le milieu influencé est égale au produit de la force contrélectromotrice par l'intensité du courant.*

La force contrélectromotrice d'un récepteur est numériquement égale à la puissance utilisable (abstraction faite de l'effet joule) qu'il dégage par unité de courant. Si la puissance est exprimée en watts, le courant en ampères, la force contrélectromotrice est exprimée en volts.

Considérons une puissance dégagée comme positive, une puissance absorbée comme une puissance dégagée négative, une force électromotrice qui réside dans un segment de résistance r comme ayant le signe du courant i qui le parcourt, si agissant dans un circuit fermé de résistance r elle produisait un courant de même sens que i, et une force contrélectromotrice, comme une force élec-

tromotrice négative faisant naître dans un circuit fermé de résistance r un courant de sens contraire à i.

La formule (1) $P = ri^2 - ei$

devient générale.

La force électromotrice totale d'un circuit est égale à la somme algébrique des forces électromotrices relatives à chacun des segments de ce circuit.

16. Tension-Voltage. — On peut toujours mettre la puissance totale dégagée par un segment de courant sous la forme

$$(2) \qquad P = Vi.$$

Le facteur V par lequel il faut multiplier l'intensité du courant pour avoir la puissance totale dégagée par le courant, s'appelle la tension aux bornes du circuit qu'il parcourt.

La puissance dégagée par un segment de courant est égale au produit de la tension entre les bornes de son circuit par le courant.

La tension a le signe du courant si la puissance est dégagée, comme dans le cas d'un récepteur ; elle a le signe contraire si la puissance est absorbée comme dans le cas du générateur.

La tension aux bornes d'un segment de circuit est égale à la somme algébrique des tensions aux bornes de chacun des segments en lesquels on peut le diviser.

L'unité pratique de tension s'appelle aussi le volt.

Le volt est la tension entre les extrémités d'un segment de circuit dans lequel un ampère dégage un watt par seconde.

Si on évalue le courant en ampères et la puissance en watts, la tension est évaluée en *volts*, on l'appelle *le voltage*.

17. Loi d'Ohm. — La puissance calorifique dégagée par un courant i dans un segment de fil homogène de résistance r est donnée par la loi de Joule.

$$P = ri^2$$

Si l'effet joule est la seule puissance dégagée, on peut écrire

$$P = Vi$$

il en résulte

$$V = ri \quad (3)$$

La tension entre les extrémités d'un segment de fil homogène, a toujours le signe du courant ; elle est égale au produit de la résistance du segment par l'intensité du courant qui le parcourt. Cette loi porte le nom de loi d'Ohm des fils homogènes. Si on évalue la résistance en ohms, le courant en ampères, le voltage est égal au nombre d'ohms contenus dans la résistance du fil multiplié par le nombre d'ampères contenus dans le courant qui le parcourt. Si 20 ampères parcourent un fil de 10 ohms de résistance, la tension aux bornes du circuit est 200 volts.

Le volt est la tension entre les extrémités d'un fil homogène d'une résistance d'un ohm traversée par un ampère.

18. Relations générales entre la tension et la force électromotrice. — Dans les cas où la puissance dégagée est différente de l'effet joule, c'est-à-dire lorsqu'une force électromotrice existe dans le circuit, la loi d'Ohm ne s'applique pas ; on a en tenant compte de (1) et (2)

$$Vi = ri^2 - ei$$

c'est à-dire

$$V = ri - e \quad (4)$$

on aurait de même

$$V = ri + e' \quad (5)$$

si la force électromotrice est remplacée par une force contrélectromotrice.

La formule (4) donne la relation générale qui existe entre le courant, la force électromotrice et la tension avec les conventions faites (§ 15).

La formule (5) donne la relation générale entre la tension, le courant et la force contrélectromotrice, avec cette condition que

la force électromotrice est une force contrélectromotrice négative.

Elle nous montre que la tension et le produit ri sont des grandeurs de même nature qu'une force électromotrice, c'est la raison pour laquelle on n'a choisi qu'une seule unité pour les exprimer. Le produit ri s'appelle chute ohmique de tension.

Considérons un générateur C fermé sur un circuit récepteur quelconque ADB.

Conformément au principe de la conservation de l'énergie, la puissance totale absorbée dans le générateur est égale à la puissance totale dégagée dans le circuit récepteur, le courant étant le même dans les circuits générateur et récepteur, la tension entre les *bornes* ou extrémités A et B du segment générateur ACB est égale et de signe contraire à la tension entre les bornes du segment ADB récepteur (§ 16).

Si on désigne par V et V' les tensions entre les bornes du circuit générateur et du circuit récepteur extérieur, on a

$$V' = -V$$

Soient r la résistance du segment générateur ACB, et i le courant ; on a (4) $V = ri - e$

d'où (6) $e = ri + V'$ [1]

Remarquons que le produit ri est la chute ohmique intérieure du générateur, et que ri et V' sont tous deux de même signe et on pourra énoncer la proposition suivante :

La force électromotrice d'un générateur est égale à la somme de la tension entre les bornes de son circuit extérieur et de sa chute ohmique intérieure.

[1] On arrive encore à cette formule de la façon suivante :

Considérons un segment de circuit contenant un générateur électrique ; la puissance absorbée dans le milieu ambiant est ei.

Cette puissance est dégagée dans le propre circuit du générateur sous forme d'effet joule et dans le reste du circuit, c'est-à-dire le circuit extérieur, sous une forme quelconque. Si V' est la tension aux bornes du circuit extérieur, on a :

$$ei = ri^2 + V'i$$

et en divisant par i : $e = ri + V'$

Si le courant est rendu suffisamment petit pour que la chute ohmique soit négligable devant la tension, ce qui se passe quand le générateur a son circuit ouvert, c'est-à-dire la résistance extérieure infinie, on a :

$$(7) \qquad e = V'.$$

La force électromotrice d'un générateur est égale à la tension entre les bornes de son circuit extérieur ouvert.

Supposons que le circuit d'un générateur d'électricité soit fermé sur un circuit extérieur homogène de résistance r'.

$$V = r'i.$$

$$(8) \qquad e = ri + r'i = (r+r')\,i.$$

La force électromotrice d'un générateur dont le circuit extérieur est une résistance, est égale au produit de la résistance totale de son circuit par l'intensité du courant qu'il débite.

19. Étincelle disruptive. — Mesure de la tension. — Voltmètre. — Si un conducteur parcouru par un courant se bifurque entre plusieurs dérivations ayant mêmes extrémités, chacune d'elles est traversée par un courant et la puissance qu'elle dégage est représentée par le produit du courant qui la traverse par la tension entre ses bornes. L'expérience montre que la tension est *la même* pour chaque dérivation. Puisque ces dérivations n'ont que leurs extrémités communes, on est amené à penser que la tension ne dépend que de l'état électrique de ces extrémités.

Cet état électrique peut se manifester par l'expérience.

Si on *rapproche* l'une de l'autre deux extrémités d'un segment de conducteur parcouru par un courant, présentant entre elles une tension suffisante, une étincelle dite étincelle *disruptive* jaillit entre elles lorsque la distance qui les sépare a atteint une valeur déterminée appelée *distance explosive* pour la tension considérée.

Cette distance est d'autant plus grande que la tension est plus

élevée et dépend de la forme des surfaces entre lesquelles jaillit l'étincelle et de la nature de l'*isolant* (§ 3) qui les sépare ; elle est à tension égale environ dix fois plus grande pour l'air que pour le verre ou l'ébonite.

L'état électrique particulier des extrémités d'un conducteur parcouru par un courant se communique à tout conducteur qui leur est relié métalliquement. Si l'on rapproche l'une de l'autre deux sphères métalliques placées dans l'air de 1 cm. de diamètre une étincelle éclate entre elles pour une distance explosive de 1 millimètre lorsque la tension est de 4.765 volts ; la distance explosive est de 10 millimètres pour une tension de 25.000 volts et de 20 millimètres, pour une tension de 30.000 volts.

Ce phénomène sert pour mesurer la tension entre conducteurs présentant entre eux une tension élevée. Pour des tensions inférieures, on a recours au phénomène suivant :

Réunissons métalliquement les deux extrémités d'un segment de circuit à deux lames métalliques *m* et *m'* mobiles l'une par rapport à l'autre. Si un courant traverse ce segment, une tension existe entre ses extrémités et on observe entre les deux plaques une attraction qui croît comme le carré de la tension.

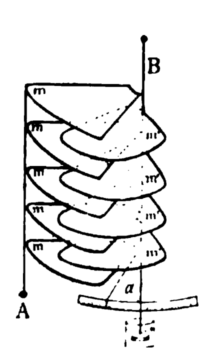


Fig. 5.

L'appareil qui mesure la tension en volts est un *voltmètre*.

Dans le voltmètre multicellulaire de Lord Kelvin (fig. 5), un certain nombre de plaques en laiton *m* sont fixées parallèlement les unes au-dessus des autres à une même tige métallique qui les porte et communique avec une borne isolée extérieure A à la cage de l'appareil. Ces plaques forment une série de compar-

timents ou cellules. L'équipage mobile se compose d'un système analogue dont les plaques *m'* peuvent entrer dans les cellules précédentes. Il est suspendu par un fil métallique extrêmement fin qui communique avec une seconde borne extérieure B. Il porte une aiguille *a* dont la pointe recourbée se déplace devant un cadran divisé et se termine vers le bas par un disque plongeant dans l'huile pour amortir les oscillations.

On réunit aux bornes du voltmètre les extrémités du circuit entre lesquelles on veut mesurer la tension.

On gradue l'appareil de la façon suivante en volts. Un courant constant de *i* ampères passe dans une résistance de *r* ohms : la tension aux bornes *v* est égale à *ri* volts. On note la déviation de l'équipage et on marque le voltage *v* à la division où s'arrête l'aiguille. En faisant varier le courant et la résistance, on réalise des voltages connus et de grandeurs différentes que l'on inscrit en face de la division où s'arrête l'aiguille.

Si, en faisant communiquer les extrémités d'un circuit aux bornes du voltmètre, l'aiguille de ce dernier s'arrête à la division 60 par exemple, le voltage entre les bornes du circuit sera de 60 volts.

20. Signe de la tension. — Le signe de la tension entre les deux extrémités d'un segment de circuit parcouru par un courant supposé positif peut être déterminé par l'expérience.

Au moment où l'on joint par des fils conducteurs les plaques *mm'* du voltmètre aux extrémités du segment, chacun des fils de jonction est parcouru par un courant de courte durée appelé courant *de charge* du voltmètre. Ces courants sont de même sens, dirigés tous deux de A vers B par C ou tous deux de B vers A (fig. 6). On peut connaître ce sens en plaçant un voltamètre ou un galvanomètre (§ 27) sur chacun des fils qui unissent les plaques métalliques aux extrémités du circuit. Si ce sens et celui

du courant dans le segment AB sont tous deux dirigés de A vers B ou tous deux de B vers A, la tension est positive. Si le premier est dirigé de B vers A quand le second est dirigé de A vers B ou inversement la tension est négative. Dans le cas d'une pile P débitant sur un circuit résistant BDA, le courant de charge a le même sens que le courant BDA : la tension entre les extrémités du segment BDA est positive; le courant de charge a le sens inverse du courant dans le segment APB : la tension aux bornes du segment APB est négative.

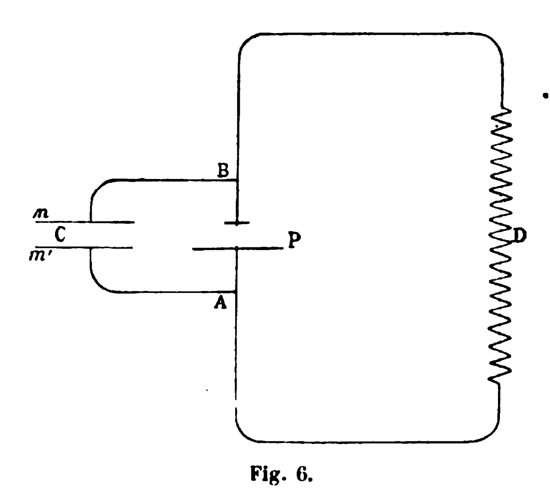


Fig. 6.

21. Condensateur. Capacité. — Si on fait l'expérience précédente avec les plaques du voltmètre, le courant de charge est tellement petit qu'on ne peut en général le déceler expérimentalement. On accroît notablement le courant en augmentant les dimensions des plaques métalliques *m m'*.

Un système de deux plaques métalliques isolées l'une de l'autre constitue un condensateur. Les plaques métalliques s'appellent les *armatures* du condensateur; le corps isolant qui les sépare s'appelle encore *diélectrique*.

La quantité d'électricité qui, dans cette expérience, traverse le voltamètre, peut être considérée comme condensée sur les armatures du condensateur; le fait suivant le démontre.

Réunissons métalliquement les deux armatures isolées d'un

condensateur aux extrémités du circuit parcouru par un courant ; enlevons ensuite ces communications, et remplaçons-les par un circuit contenant un voltamètre ou un galvanomètre (§ 27) ; on constate que le voltamètre ou le galvanomètre est traversé par un courant de *décharge* de très courte durée. On multiplie l'effet de ce courant en répétant un grand nombre de fois l'expérience.

La quantité d'électricité transportée par ce courant et qui *chargeait* ce condensateur est proportionnelle à la tension V entre ses armatures.

$$Q = CV$$

Le facteur de proportionnalité C s'appelle la capacité du condensateur. La capacité est d'autant plus grande que les plaques ont une surface plus grande et sont plus rapprochées.

Si Q est évalué en coulombs, V en volts, C est évalué en farads.

Le farad est l'unité pratique de capacité.

Un condensateur d'un microfarad, c'est-à-dire $\frac{1}{10^6}$ farad, chargé à une tension de 1000 volts entre ses armatures, a une *charge* de $\frac{1000}{10^6} = \frac{1}{10^3}$ coulomb.

CHAPITRE III

RELATIONS ENTRE LE CHAMP MAGNÉTIQUE ET LE COURANT ÉLECTRIQUE

22. Aimants. — Un aimant est une substance capable d'attirer la limaille de fer.

Les aimants se rencontrent dans la nature ; l'oxyde magnétique de fer est un aimant naturel. On peut encore les produire artificiellement. Si on place un barreau d'acier suivant l'axe d'une



bobine dans laquelle on fait passer un courant, ce barreau acquiert la propriété d'attirer la limaille de fer, il devient un aimant. Le fer et ses variétés, acier, fonte, le nickel et le cobalt sont les seules substances susceptibles de *s'aimanter.* Toutes les autres matières ne s'aimantent pas.

23. Pôles.— On constate que la limaille s'attache surtout aux extrémités du barreau aimanté. Celles-ci ont reçu le nom de *pôles.*

Ces pôles ne jouissent pas des mêmes propriétés ; si l'on suspend le barreau par son milieu de façon qu'il puisse osciller dans un plan horizontal on forme une *boussole* ; une extrémité déterminée se dirige toujours vers le pôle nord géographique et l'autre vers le pôle sud. L'extrémité qui se dirige vers le pôle nord est appelée pôle nord ou austral de l'aimant, l'autre est le pôle sud ou boréal. On appelle *axe magnétique* d'un aimant, la demi-droite qui joint son pôle sud à son pôle nord.

24. Action des aimants entre eux. — On constate que deux pôles nord d'aimants mis en présence se repoussent ; un pôle nord et un pôle sud s'attirent ; d'où l'on déduit cette loi : deux pôles d'aimants de même nom se repoussent, deux pôles de nom contraire s'attirent.

Cette propriété est utilisée pour connaître la nature d'un pôle d'aimant ; on l'approche du pôle nord de l'aiguille aimantée d'une boussole ; si le pôle de l'aimant est repoussé, c'est un pôle nord ; s'il est attiré, c'est un pôle sud.

25. Lignes de force. — Une petite aiguille aimantée placée au voisinage d'un aimant, oriente son axe magnétique dans un sens et une direction définis qu'on appelle le sens et la direction des lignes de force au point considéré. On appelle *lignes de force* des lignes telles que la tangente en un quelconque de ses points

représente la direction que prendrait l'axe magnétique d'une petite aiguille magnétique mobile autour de ce point, soumise aux seules actions magnétiques.

Les lignes de force vont du pôle nord au pôle sud à l'extérieur de l'aimant.

Elles peuvent se mettre en évidence par le spectre magnétique.

On place sur un aimant une feuille de carton que l'on saupoudre de limaille de fer; en agitant légèrement le carton de façon à rendre la limaille momentanément mobile, on voit bientôt la limaille dessiner les lignes de force de l'aimant. Leur ensemble forme le spectre magnétique (fig. 7).

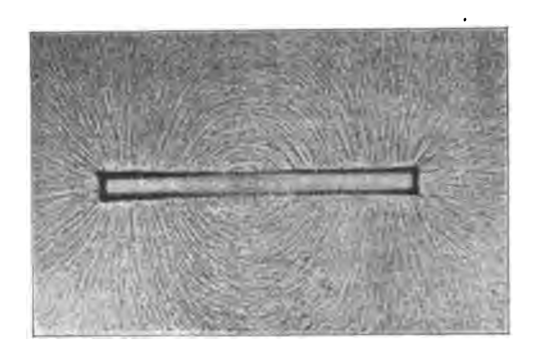


Fig. 7.

26. Lignes de force d'un courant. — Un courant agit sur un aimant. Chaque ligne de force qu'il crée est une courbe fermée qui s'enlace avec le circuit fermé du courant comme deux anneaux d'une chaîne, fig. 12 (§ 37). Pour en définir le sens, appelons *face droite* et *face gauche* du courant fermé, les faces de l'aire qu'il limite qui se trouvent à la droite ou à la gauche d'un observateur qui nage dans le courant, de façon que le courant lui entre par les pieds et sorte par la tête, et qui regarde l'intérieur de l'aire.

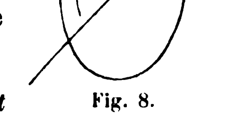


Fig. 8.

Les lignes de force d'un courant fermé percent l'aire limitée par le courant de sa face droite vers sa face gauche (fig. 8).

27. Action des aimants sur les courants. Galvanomètre Déprez. — Un aimant agit sur un courant. Soit un fil métallique enroulé sur un cadre rectangulaire; les extrémités du fil sont tendues de façon que le cadre soit mobile autour d'un axe vertical; le cadre est placé entre les branches d'un aimant en fer à cheval (fig. 9). On constate que le cadre, lorsque le fil est parcouru par un courant, dévie d'un angle tel que le couple de torsion fasse équilibre au couple des forces électromagnétiques.

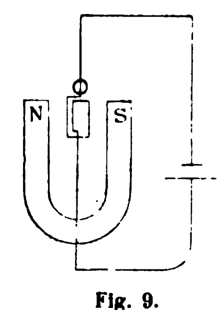


Fig. 9.

Cet appareil est le galvanomètre Déprez et d'Arsonval. Pour rendre la déviation plus sensible, on fixe un petit miroir au-dessus du cadre mobile : on projette sur lui un faisceau lumineux qui se réfléchit en donnant sur une règle transparente placée à une certaine distance une tache lumineuse dont on peut observer facilement les déplacements. Quand le cadre tourne, le miroir tourne avec lui et la tache lumineuse se déplace sur la règle.

On peut à l'aide de cet appareil mesurer un millionième d'ampère, c'est-à-dire un microampère ; cette intensité correspond à la déviation d'un millimètre sur la règle divisée placée à un mètre du cadre. Il y a des galvanomètres mille fois plus sensibles.

28. Induction. — Un aimant peut faire naître un courant dans un circuit où il n'en existait pas ; le circuit est dit induit, et l'aimant inducteur. Si l'on déplace un circuit métallique, relié à un galvanomètre, devant un pôle d'aimant, le galvanomètre dévie.

On dit qu'un aimant développe autour de lui *un champ magnétique*.

29. Intensité du champ. Flux de force. — L'intensité du champ magnétique se mesure par la quantité d'électricité

induite. On mesure cette quantité au moyen d'un galvanomètre convenablement gradué.

Devant un aimant, on place une petite bobine de fil métallique dont les extrémités communiquent par deux fils conducteurs avec un galvanomètre (fig. 10). Si l'on enlève brusquement cette bobine loin de tout aimant ou courant, on constate une déviation du galvanomètre. Si l'on répète l'expérience en plaçant le centre de la bobine toujours au même point M du champ, on constate qu'en général on a des déviations différentes ; la quantité d'électricité induite dépend de l'orientation dans l'espace de la normale au plan de la spire ou des spires du circuit ; elle est maxima quand la direction de cette normale coïncide avec la direction des lignes de force qui traversent l'aire des spires de la petite bobine (¹) ; *la direction des lignes de force est la direction du champ* ; elle est proportionnelle au cosinus de l'angle que fait la normale avec le champ, proportionnelle au nombre de spires enroulées sur la bobine et à la surface d'une spire ; enfin elle est en raison inverse de la résistance du circuit traversé par le coucourant induit, c'est-à-dire du circuit formé par le galvanomètre et la bobine ; on a :

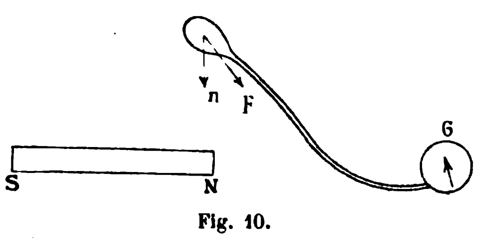


Fig. 10.

$$q = \frac{F.\ n.\ S.\ cos\ (F,\ N)}{R}$$

Le facteur de proportionnalité F est appelé l'*intensité du champ*.

F cos (F, N) est la composante du champ suivant la normale au plan du circuit.

(¹) Pour que cette aire ait un sens précis, il est nécessaire de supposer que les spires de la bobine sont très serrées ; l'aire d'une spire est alors l'aire de la projection de la spire sur un plan perpendiculaire à l'axe de l'hélice qu'elle trace.

Enfin F S cos (F, N) s'appelle le *flux de force* ou flux d'induction à travers une spire, et n F S cos (F, N) est le flux à travers toute la bobine.

Si on désigne ce dernier flux par Φ

on a (1) $\Phi = n \text{ S F } \cos (\text{F, N})$

d'où $$q = \frac{\Phi}{\text{R}}$$

si q est exprimé en coulombs et R en ohms, Φ est le flux exprimé en unités pratiques de flux.

Si, pour évaluer la surface, on prend comme unité de longueur le quadrant, c'est-à-dire le quart du méridien terrestre, 10^9 centimètres, Φ étant évalué en unités pratiques, H sera évalué en unités pratiques.

Pour évaluer les champs, on n'emploie pas les unités pratiques mais une unité 10^{10} fois plus grande que l'on appelle le *gauss*.

30. Lois générales de l'induction. — Quantité d'électricité : La formule $$q = \frac{\Phi}{\text{R}}$$
a été obtenue par l'expérience ; elle a été établie avec une grande exactitude ; elle s'applique uniquement au cas où l'on passe d'un point voisin de l'aimant à un point éloigné.

Or, quand on passe d'une position voisine de l'aimant à une autre position voisine, ou même quand on fait tourner le circuit autour d'un axe fixe, on observe encore un courant induit; la quantité d'électricité induite est donnée par la loi générale suivante.

Quand un circuit passe d'une position où le flux qui le traverse est Φ_1 à une position où le flux est Φ_2, la quantité d'électricité induite est égale au quotient de la variation du flux $\Phi_1 - \Phi_2$ par la résistance du circuit.

$$(2) \qquad q = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\text{R}}$$

C'est la formule fondamentale de l'induction. Elle renferme comme cas particulier le cas envisagé précédemment où le circuit s'éloigne à l'infini de l'aimant ; car si l'on passe d'une position voisine de l'aimant à une position très éloignée, où le champ n'est plus sensible, on fait varier le flux du flux lui-même, puisque $\Phi_2 = o$.

Pour produire un courant induit, il n'est pas nécessaire de déplacer le circuit, il suffit de faire varier le champ.

On enroule sur une bobine quelques spires d'une seconde bobine communiquant avec un galvanomètre. Si l'on ferme le circuit de la première bobine de façon à y faire naître un courant, on développe un champ ; on constate que la bobine extérieure est traversée par un courant ; si on a mesuré les flux Φ_1, Φ_2, pour deux valeurs quelconques i_1, i_2 du courant, l'expérience montre que l'on a encore :

$$q = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R}$$

quand on fait varier le courant de i_1 à i_2.

La formule (2) est entièrement générale, elle est vraie à chaque instant de la durée.

La quantité d'électricité induite dans une bobine dans laquelle le flux d'induction varie de Φ_1 à Φ_2, est égale au quotient de la variation du flux par la résistance du circuit parcouru par le courant.

INTENSITÉ. — L'intensité dans l'expérience ci-dessus a varié de zéro à une certaine valeur, puis est redescendue à zéro. Nous allons définir l'intensité en la rapportant à un temps dt assez petit pour que l'on puisse considérer la variation de l'intensité comme négligeable devant elle-même.

La variation du flux étant $d\Phi$ pendant le temps dt, la quantité d'électricité transportée par le courant i est (§ 7) :

$$dq = idt$$

or :

$$dq = \frac{d\Phi}{R}$$

donc :

$$i = \frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}$$

$\frac{d\Phi}{dt}$ est le taux de variation du flux.

FORCE ÉLECTROMOTRICE.— Si l'on multiplie les deux membres de l'égalité précédente par R, il vient : $Ri = \frac{d\Phi}{dt}$ mais Ri est égal à la force électromotrice e (§ 18) ; $\frac{d\Phi}{dt}$ est le taux de variation du flux ; donc

$$e = \frac{d\Phi}{dt}$$

La force électromotrice d'induction est égale au taux de variation du flux qui traverse l'aire du circuit.

Si t est évalué en secondes et Φ en unités pratiques de flux, e est exprimé en volts.

31. Sens des courants induits. — 1re *Règle* de Maxwell, ou du tire-bouchon. Soit une spire et les lignes de force la traversant d'avant en arrière (fig. 11), enfonçons un tire-bouchon dans l'aire limitée par la spire dans le sens des lignes de force. Quand le flux augmente, le sens du courant dans la spire est inverse de celui du tire-bouchon ; quand le flux diminue, le sens du courant est celui du tire-bouchon.

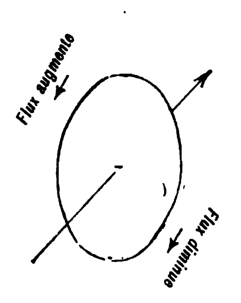


Fig. 11.

2me *Règle.* — Le courant induit dans un circuit a un sens tel que, par le flux qu'il crée, il *contrecarre* la variation de flux qui lui a donné naissance ; par exemple, si le flux pénétrant par une face d'un circuit augmente, le courant induit est tel que la face considérée est la face gauche du courant induit.

3me *Règle.* — Supposons un courant dans la spire (fig. 8), il a une

face droite et une face gauche. Quand le flux de force entrant par la face droite augmente, le courant induit est de sens contraire au courant supposé, si le flux diminue le sens du courant réel est celui du courant supposé.

Convenons de considérer comme positif le courant qui parcourt le circuit dans le sens supposé, négatif le courant de sens inverse.

Considérons comme positif le flux entrant par la face droite du circuit parcouru par le courant positif et négatif le flux entrant par sa face gauche. Si $d\Phi$ représente la variation du flux entrant par une face quelconque du circuit pendant le temps dt, le courant et la force électromotrice sont à chaque instant donnés par les relations

$$i = \frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

$$e = \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

32. Induction par mouvement de conducteurs. — Considérons un circuit de forme invariable, se déplaçant dans un champ magnétique d'intensité et direction invariables.

Le flux qui traverse l'aire balayée par le circuit dans son déplacement s'appelle le *flux coupé* par le circuit, parce que le circuit coupe, en réalité, les lignes de force du champ. On démontre que le flux coupé par le circuit est égal à la variation du flux qui traverse son aire ; on pourra donc, dans les lois de l'induction que nous avons rappelées, remplacer la variation du flux par le flux coupé ; les formules (3) et (4) seront générales à condition que le flux coupé soit considéré comme positif *quand le circuit se déplace dans un sens tel que l'observateur qui nage dans le circuit dans le sens du courant positif et regarde dans le sens des lignes de force, se sente entraîné vers sa droite.*

On étend cette loi au cas d'un segment de conducteur. Soit

un segment de circuit de longueur l ; soient d la composante de son déplacement infiniment petit, suivant la normale au segment dans l'aire balayée, et H, la composante du champ suivant la normale à l'aire balayée ; la surface balayée est ld, le flux coupé est Hld ; la force électromotrice induite dans le segment est égale au quotient du flux coupé par le temps que dure le déplacement,

$$e = \frac{Hld}{t}$$

mais $\frac{d}{t}$ est la vitesse v du déplacement ; on a donc

$$(5) \qquad e = Hlv$$

La force électromotrice induite dans un segment de conducteur de longueur l qui coupe les lignes de force d'un champ de composante H normale à l'aire balayée, avec une vitesse de composante v perpendiculaire au segment dans l'aire balayée, est égale au produit des trois grandeurs Hlv.

33. Puissance des forces électromagnétiques. — Lorsqu'on déplace un circuit dans un champ magnétique, ce circuit devient le siège d'une force électromotrice e et d'un courant i et absorbe une puissance extérieure ei. Si la force électromotrice et le courant sont constants, le circuit se déplaçant avec une vitesse constante, il faut que les forces extérieures soient à chaque instant équilibrées par les forces électromagnétiques qui s'exercent entre le circuit et le champ, *les forces électromagnétiques effectuent donc un travail résistant dont la puissance est à chaque instant égale au produit du courant par la force électromotrice induite par le mouvement du conducteur dans le champ magnétique extérieur.* Cette loi est entièrement générale, on en déduit cette règle qui porte le nom de loi de Lenz.

34. Loi de Lenz. — Dans l'induction par mouvement de conducteur, *le courant induit a un sens tel que son action électro-*



magnétique sur le champ inducteur tend à s'opposer au mouvement qui lui a donné naissance.

35. Courants de Foucault. — *Un conducteur quelconque étendu à trois dimensions est le siège de courants induits quand on le place dans un champ variable, ou quand on le déplace dans un champ constant.* Ces courants s'appellent courants de Foucault. La loi de Lenz est entièrement générale et s'applique aussi bien à l'induction subie par un conducteur quelconque étendu à trois dimensions qu'aux conducteurs filiformes considérés jusqu'ici. Si on fait tourner rapidement un cube de cuivre suspendu à un fil, on ralentit considérablement son mouvement en approchant de lui un aimant; l'aimant induit des courants dans le cuivre et les actions électromagnétiques qui s'exercent entre les courants et le champ, gênent le mouvement, à la manière d'un *frottement électromagnétique*.

CHAPITRE IV

L'ÉLECTRO-AIMANT

36. Aimantation du fer doux. — Électro-aimant.— Si dans une bobine traversée par un courant on introduit un barreau de fer doux, ce barreau s'aimante; son aimantation cesse quand on le retire ou qu'on supprime le courant ; on constate ces phénomènes par l'attraction de pointes de fer doux.

Cette découverte est due à Arago. Le barreau de fer doux prend deux pôles à ses extrémités et la nature de ces pôles est définie par le sens du courant, d'après la règle suivante :

Plaçons-nous sur l'axe de la bobine en face de l'une de ses extrémités et regardons les spires (fig. 13); si le courant les parcourt

dans le sens des aiguilles d'une montre, nous avons le plus près de nous un pôle sud ; si le courant parcourt les spires dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, nous avons le plus près de nous un pôle nord. Cette règle se vérifie facilement au moyen d'une boussole (§ 24).

La bobine seule exerce sur l'aiguille aimantée une action de même sens que si elle est munie de son barreau de fer doux ; l'introduction du barreau de fer doux ne change pas le sens des forces magnétiques, mais elle en augmente considérablement l'intensité.

Le système bobine et fer doux à son intérieur constitue un *électro-aimant*.

37. Flux d'un électro-aimant. — L'étude du flux de l'électro-aimant a une importance considérable.

Passons une autre bobine B' sur la première B (fig. 12) d'abord sans courant ni fer doux, et intercalons la seconde bobine dans le circuit d'un galvanomètre. Si nous faisons passer alors un courant dans la première bobine dite inductrice, un courant instantané passe dans la seconde bobine dite induite ; ce courant est très petit, l'aiguille du galvanomètre dévie très peu ; si nous recommençons la même expérience avec le même courant inducteur après avoir introduit un noyau de fer doux, la déviation de l'aiguille du galvanomètre est considérablement augmentée.

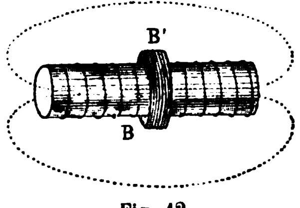


Fig. 12.

L'introduction du fer doux augmente donc considérablement le pouvoir inducteur de la bobine inductrice.

38. Perméabilité du fer doux. — Soit une bobine parcourue par un courant.

Si l'on place la bobine induite de façon que ses spires soient

normales au champ, le flux Φ qui la traverse a pour expression :

$$(1) \qquad \Phi = SH$$

S étant la surface des spires, H le champ.

Quand on supprime le courant, la quantité q d'électricité induite a pour expression :

$$q = \frac{\Phi}{R}$$

R est la résistance du circuit induit;
q et R étant mesurables, on peut en déduire Φ et ensuite H par la formule (1).

Répétons l'expérience avec la même bobine, mais en y introduisant un barreau de fer doux ; on trouve alors pour q une valeur q' plus grande que précédemment.

Appliquons encore la formule de l'induction. On a :

$$q' = \frac{\Phi'}{R}$$

Φ' étant le nouveau flux. On a

$$q' = pq,$$

il en résulte : $\Phi' = p\Phi$;

pour un même courant inducteur dans la bobine, le flux devient p fois plus grand quand on introduit un noyau de fer.

Soient H le champ, c'est-à-dire le flux par unité de section de la bobine sans fer, et B' le flux par unité de section dans le fer doux; si l'intérieur de la bobine est dans la seconde expérience remplie entièrement par le barreau de fer doux, on a :

$$(2) \qquad \Phi' = B' S$$

d'où

$$(3) \qquad B' = p H$$

nous appellerons p la *perméabilité* du fer doux dans les conditions de l'expérience.

Le flux par unité de section a reçu le nom d'*induction*.

L'induction dans le fer doux d'un électro-aimant est égale à l'induction dans la bobine sans fer multipliée par la perméabilité du fer doux.

Le coefficient p dépend de plusieurs facteurs : la nature du fer, la longueur du barreau, le nombre des spires enroulées sur la bobine et le courant qui les traverse.

39. Force démagnétisante. — Lorsque dans une bobine on introduit un barreau de plus en plus long, on constate que, pour un même courant inducteur, la quantité d'électricité induite dans l'expérience précédente va en croissant avec la longueur du barreau; p croît donc avec la longueur du barreau ; cherchons à expliquer pourquoi il en est ainsi.

Si l'on place une aiguille aimantée dans la bobine, on constate qu'à l'intérieur de la bobine le champ est dirigé de la face droite à la face gauche des spires (fig. 13), c'est-à-dire du pôle sud au pôle nord, et qu'à l'extérieur de la bobine les lignes de force vont du pôle nord au pôle sud.

face droite S s n N face gauche

Fig. 13.

Si donc on plaçait un barreau de fer doux dans cette bobine et une aiguille aimantée infiniment petite dans une cavité creusée dans le fer doux vers le centre de la bobine, le pôle nord du barreau repousserait le pôle nord de l'aiguille aimantée et attirerait son pôle sud ; les pôles du barreau produisent donc un champ contraire à celui de la bobine (§ 29) ; on dit que les pôles exercent une action démagnétisante sur l'intérieur de la bobine.

Or, l'action d'un pôle sur un autre varie en raison inverse du carré de la distance ; il en résulte que si l'on veut réduire l'influence démagnétisante, il y a lieu d'employer un long barreau ; on éloigne ainsi les pôles perturbateurs de ce barreau et on atténue leur action sur le fer de la bobine.

40. Circuit magnétique fermé. — On peut encore détruire ou du moins neutraliser cette influence en rapprochant le pôle nord du pôle sud, c'est-à-dire en courbant le fer doux en forme de fer à cheval ; on la réduit même à zéro en réunissant les deux pôles de façon à former un anneau fermé sur lui-même.

L'induction est maxima dans cette dernière disposition, et on dit alors que le circuit magnétique est fermé.

41. Mesure de la perméabilité. — Si l'on forme un anneau de fer sur lequel on enroule régulièrement une bobine de manière à le recouvrir entièrement (fig. 14), le coefficient p déterminé comme au § 37, ne dépend que de la nature du fer employé et du champ magnétique dans lequel il est placé ; il ne dépend ni de la longueur, ni de la section du noyau ; on l'appelle la *perméabilité* du fer pour le champ considéré.

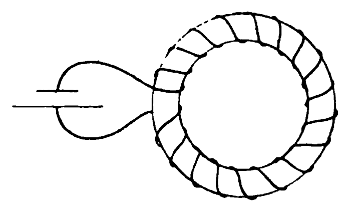


Fig. 14.

A l'intérieur d'une bobine annulaire régulièrement enroulée, les lignes de force sont des circonférences parallèles à la circonférence moyenne (lieu des centres des spires supposées circulaires) et le champ moyen dans une section droite exprimé en gauss est égal à $\frac{4\pi ni}{10\,l}$, n étant le nombre total des spires, l la longueur de la circonférence moyenne en centimètres, i le courant évalué en ampères qui passe dans la bobine ; ni est le *nombre d'ampères tours* enroulés sur la bobine.

Le coefficient p varie avec le champ ; on a fait à ce sujet des expériences nombreuses ; le tableau suivant donne les résultats principaux pour certains échantillons de fer, d'acier et de fonte.

Le champ et l'induction sont tous deux exprimés en gauss.

Fer forgé doux			Acier doux			Fonte		
H	B	p	H	B	p	H	B	p
2	5.000	2.500	3	8.000	2.636	2.8	1.508	538
12	13.000	1.083	10.9	13 300	1.220	9.62	3.150	327
50	16.000	320	28	15.275	545	25.5	6.110	239
350	19.000	54	39	15.775	402	52.7	7.680	146
20.000	33.000	1,6	188	18.100	96	118	9 276	78

Pour les substances magnétiques : nickel, cobalt, fer, acier, fonte, p diminue quand H augmente et tend vers l'unité pour des champs très intenses. Pour tous les autres corps $p = 1$.

On voit encore que plus le fer contient de carbone, plus p est petit pour le même champ (l'acier doux est presque du fer pur contenant environ $\frac{1}{1000}$ de carbone). La perméabilité du fer est modifiée par la moindre impureté, ainsi la présence de $\frac{1}{1000}$ de manganèse a une influence très nuisible. Il y a donc avantage à employer le fer doux ; la fonte n'est employée que par économie.

Le nickel et le cobalt ont une perméabilité plus faible que le fer.

42. Variation de l'induction avec le champ. — Représentons graphiquement l'induction en fonction du champ ; portons en abscisses des longueurs proportionnelles au champ et en ordonnées des longueurs proportionnelles à l'induction (fig. 15).

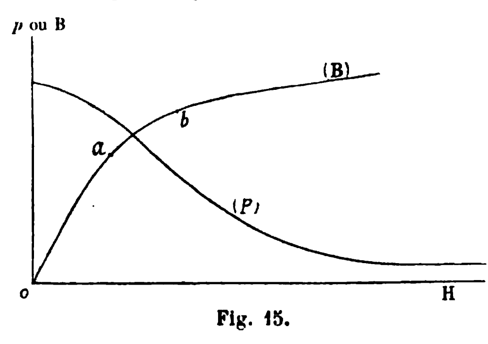


Fig. 15.

On voit que la courbe de l'induction (B) est formée de trois parties principales : les deux extrêmes sont presque des droites, la moyenne est une courbe assez prononcée *a b*.

Le point *a* correspond au champ 4,5 gauss environ pour le fer doux. La perméabilité varie avec *h* suivant la courbe (*p*).

43. Hystérésis. — Supposons maintenant qu'après avoir augmenté le champ jusqu'à une certaine valeur *h*, à laquelle correspond le point S de la courbe de l'induction, on le fasse décroître (fig. 16) ; l'induction B ne reprend pas les mêmes valeurs et on obtient une nouvelle courbe située au-dessus de la première ; quand le champ est revenu à zéro, l'induction n'est pas nulle, elle a encore une certaine valeur positive ; le fer doux n'est pas désaimanté : il y a une aimantation rémanente.

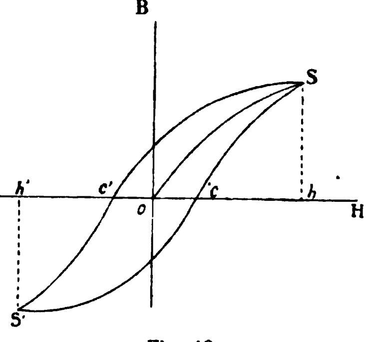


Fig. 16.

Renversons maintenant le champ, ce qui revient à le faire décroître algébriquement ; la valeur positive de B diminue, elle s'annule pour une certaine valeur OC' de *h* ; si l'on continue à faire croître en valeur absolue jusqu'à *h'* symétrique de *h* par rapport à O, la courbe descend jusqu'au point S' symétrique de S ; si l'on diminue ensuite ce champ inversé, ce qui revient à faire croître le champ algébriquement, on obtient une nouvelle branche de courbe symétrique de la première aboutissant au point de départ S, auquel on revient lorsque *h* est revenu à sa valeur maxima O*h*.

En recommençant ensuite les mêmes variations de H, on obtient une nouvelle courbe intérieure et voisine de la première avec laquelle elle a les points S et S' communs ; mais après 3 ou 4 oscillations du champ entre *h* et *h'*, cette courbe ne varie plus.

Quand on fait varier le champ de $+ h$ à $- h$, puis de $- h$ à $+ h$, on dit que le fer suit un cycle d'*hystérésis* (d'un mot grec

qui signifie retard ; l'induction est en retard sur le champ pour s'annuler). Dans la courbe de la fig. 15 qui représente l'induction en fonction du champ, l'induction portée est la valeur moyenne correspondante aux courbes ascendante et descendante.

Le cycle d'hystérésis dépend de la nature du fer ; plus le fer est pur, plus les branches sont voisines l'une de l'autre ; plus au contraire le fer se rapproche de la fonte, plus les branches s'écartent.

44. Pertes d'énergie par hystérésis. — L'hystérésis joue un rôle important en électrotechnique ; le fer qui s'aimante et se désaimante dans des cycles d'hystérésis, s'échauffe ; la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle à la surface du cycle d'hystérésis et par suite d'autant plus grande que les branches sont plus écartées pour une même induction maximum : l'énergie correspondante est perdue, elle est comparable à celle qui se dégage dans les machines par le frottement mécanique ; le phénomène d'hystérésis est une sorte de *frottement magnétique.*

Il est très utile, pour connaître le rendement des machines électromagnétiques, de déterminer les pertes par hystérésis dans les matériaux à employer.

Steinmetz a donné la formule suivante exprimant l'énergie dégagée W par centimètre cube de fer et par cycle d'hystérésis en fonction de l'induction maxima :

$$W = K\,B^{1,6}$$

Le coefficient K dépend de la nature du fer ; voici différentes de ses valeurs pour certains échantillons :

Tôle douce	Tôle douce recuite	Acier doux	Fonte
0,00323	0,00163	0,00272	0,0163

L'hystérésis est le plus petit dans le fer doux.

La fonte occasionne pour la même induction maxima une perte beaucoup plus grande que le fer doux.

45. Formule d'Hopkinson. — Soit une bobine inductrice régulièrement enroulée sur un anneau de fer doux formant un circuit magnétique fermé.

Si l'on a une seconde bobine mobile, passée sur cet anneau, on constate que, quelle que soit sa position, la quantité d'électricité induite est la même, quand on supprime un courant déterminé dans la bobine inductrice ; ce fait se démontre facilement en intercalant un galvanomètre dans le circuit induit. Il est encore approximativement vrai dans le cas où les spires ne recouvrent qu'une partie de l'anneau (fig. 17).

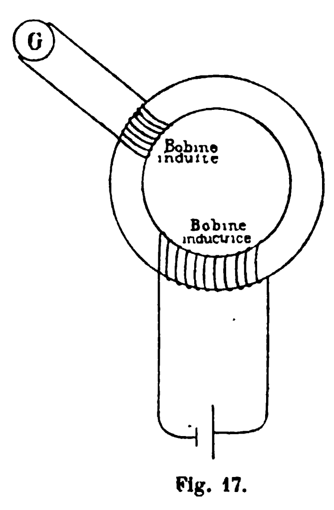


Fig. 17.

Considérons l'anneau recouvert entièrement par n spires régulièrement enroulées sur une bobine traversée par un courant. Evalué dans un système d'unités électromagnétiques quelconque, le champ a la valeur

$$H = 4\pi \frac{n i}{l} ;$$

l étant la longueur de la circonférence lieu du centre des spires ; (nous avons donné sa valeur en gauss en fonction des ampère-tours (§ 41).

Quand la bobine est remplie de fer doux, on a pour valeur du flux par unité de section, c'est-à-dire pour l'induction (§ 38) (3) :

$$B = pH,$$

p représentant la perméabilité du fer doux.

Le flux traversant la section S a pour valeur le produit BS ; soit Φ ce flux qui est le même pour une section quelconque, normale à la circonférence moyenne de l'anneau.

On a : $\Phi = BS = pHS$

et par suite : $\frac{\Phi l}{pS} = 4\pi ni.$

Hopkinson a eu l'idée de comparer cette formule à celle relative au courant fourni par une pile dans un circuit fermé $ri = e$ (§ 18) ;

e représentant la force électromotrice de la pile et r la résistance du circuit.

On peut écrire (§ 11) (3) : $r = \frac{l}{cs}$

et par suite : $\frac{l}{cs} i = e.$

Hopkinson compare $4\pi ni$ à la force électromotrice de la pile et il appelle cette quantité : *force magnéto-motrice* ; il compare le flux Φ au courant i de la pile, et $\frac{l}{pS}$ à la résistance r ; il appelle cette dernière quantité *résistance magnétique* ou *réluctance* du circuit magnétique ; désignons-la par R et posons $4\pi ni = F$,

il vient : $R\Phi = F$,

formule analogue à celle qui exprime la loi d'Ohm.

Cette formule est encore approchée lorsque l'anneau circulaire se déforme ou présente une coupure ou *entrefer;* la résistance comprend alors la somme des résistances magnétiques du fer et de l'entrefer ; la longueur du circuit magnétique est la longueur moyenne des lignes de force ; sa section est normale à la direction moyenne de ces lignes. C'est sur cette loi que l'on se fonde pour construire rationnellement tous les appareils électromagnétiques.

Si nous remarquons que les courants d'induction et les forces électromagnétiques sont proportionnels au flux, la formule d'Hopkinson nous montre immédiatement qu'avec un courant donné et un nombre de spires donné, le flux est maximum quand la résistance magnétique du circuit est minimum ; il faut donc faire en sorte que le trajet des lignes de force soit aussi court que possible, dans des milieux aussi perméables que possible.

DEUXIÈME PARTIE

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DU COURANT ALTERNATIF

CHAPITRE V

FRÉQUENCE. — INTENSITÉ, TENSION ET FORCE ÉLECTROMOTRICE EFFICACES

46. Courant alternatif. — Les piles produisent des courants continus ; les phénomènes d'induction produisent des courants alternatifs.

On appelle *courant alternatif*, un courant qui parcourt un circuit alternativement dans un sens et dans le sens inverse.

Considérons un circuit métallique mobile dans un champ magnétique. Si le plan du circuit est perpendiculaire aux lignes de force qui le traversent, le flux est maximum et entre par l'une des faces du circuit, la face droite, par exemple. Si l'on fait tourner le circuit autour d'un axe perpendiculaire aux lignes de force et contenu dans son plan, le flux diminue ; il devient nul quand le plan du circuit contient les lignes de force. Si l'on continue la

rotation, le flux entre par l'autre face du circuit, la face gauche : il devient négatif; sa valeur absolue augmente, passe par un maximum, puis diminue, et ainsi de suite.

Le courant induit dans le circuit sera donc alternatif. On le constate facilement en insérant dans le circuit mobile un galvanomètre.

Les courants alternatifs ont été peu employés pendant longtemps; on s'en rend compte en examinant leurs propriétés principales.

1° *Propriétés électrolytiques.* — Un courant continu traversant une solution métallique ou acide dépose sur l'électrode négative le métal ou l'hydrogène, et sur l'électrode positive l'élément métalloïdique uni au métal. Un courant alternatif décompose les combinaisons qu'il traverse, mais ne sépare pas les éléments de la combinaison; une électrode quelconque devient tour à tour positive et négative.

Par exemple, si l'on fait passer un courant alternatif dans un voltamètre contenant de l'eau acidulée, le volume de gaz dégagé, au bout d'un temps quelconque, dans chacune des éprouvettes placées sur les électrodes, est le même et composé d'un mélange tonnant d'hydrogène et d'oxygène. En courant continu, le volume de gaz dégagé à l'électrode négative est constamment double du volume dégagé à l'électrode positive ; à la première, on a de l'hydrogène et à la seconde de l'oxygène.

2° *Propriétés électromagnétiques.* — Le courant continu dévie l'aiguille aimantée de sa position d'équilibre; le courant alternatif industriel ne la dévie pas.

Les courants alternatifs ordinairement employés dans la pratique changent environ 100 fois de sens par seconde; si donc pendant $\frac{1}{100}$ de seconde l'aiguille est sollicitée à se déplacer vers la droite, pendant le $\frac{1}{100}$ de seconde suivant elle est sollicitée à se déplacer

vers la gauche par des forces égales aux précédentes ; il en résulte que l'aiguille magnétique ordinaire n'est pas déviée, car elle n'a pas le temps de se déplacer suivant le sens du courant; il faudrait une aiguille d'une sensibilité excessive pour suivre les oscillations du courant ; ceci est réalisé dans l'*oscillographe*.

3° *Propriétés thermiques.* — Le courant alternatif produit des effets thermiques comme le courant continu : dégagement de chaleur et de lumière. Le sens du courant n'influe que sur certaines particularités secondaires du phénomène. Ainsi dans la lampe à arc, alimentée en courant continu, le charbon positif est à une température beaucoup plus élevée que le charbon négatif ; en courant alternatif, les deux charbons étant tour à tour positifs et négatifs sont à la même température également incandescents.

47. Emploi du courant alternatif. — Le courant alternatif n'a servi pendant très longtemps qu'à l'éclairage, le courant continu lui étant préféré en général dans les autres applications.

Ainsi la galvanoplastie et certaines métallurgies ne peuvent pas se faire par le courant alternatif. Les moteurs à courant continu sont restés longtemps les seuls employés.

Actuellement, le courant alternatif se développe d'une façon intense.

Les moteurs à courants alternatifs polyphasés remplacent, dans certains cas, avantageusement les moteurs à courants continus. Les transformateurs de tension permettent de transporter et de distribuer économiquement l'énergie à des distances de plusieurs centaines de kilomètres, et, pour les applications qui nécessitent d'une façon absolue une même direction de courant, l'emploi des commutatrices et des convertisseurs permet de convertir aisément le courant alternatif en continu.

48. Période, fréquence, pulsation. — Si le circuit générateur du courant alternatif tourne dans le champ magnétique d'une vitesse uniforme, l'intensité du courant induit dans ce circuit repasse par les mêmes valeurs à des intervalles de temps égaux.

On appelle *période* du courant alternatif, le temps le plus court au bout duquel le courant reprend identiquement la même valeur et les mêmes propriétés.

La *fréquence* du courant est le nombre de périodes par seconde ; si T représente la période et f la fréquence, on a : $f = \frac{1}{T}$.

Ainsi, les courants alternatifs usuels ayant une période de $\frac{1}{40}$ à $\frac{1}{50}$ de seconde, la fréquence de ces courants est de 40 à 50 par seconde, les changements de sens ou alternances sont dans ces conditions de 80 à 100 par seconde.

On appelle *pulsation* d'un courant, le produit $2\pi f$ de la fréquence par 2π.

49. Courbes de courants alternatifs. — Pour connaître complètement un courant alternatif, il faudrait d'abord connaître à chaque instant son intensité et la tension qu'il détermine entre les extrémités du circuit.

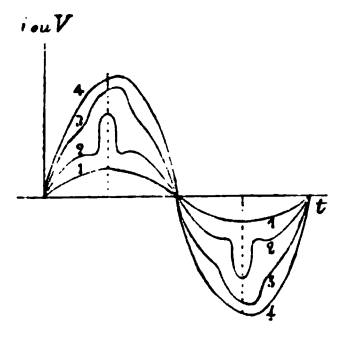


Fig. 18.

Prenons deux axes de coordonnées rectangulaires ; portons en abscisses les temps écoulés depuis une origine fixe et en ordonnées les intensités du courant aux instants correspondants ; le point ainsi obtenu pour chaque instant décrit une courbe qui s'appelle la courbe du courant (fig. 18).

Si, sur les mêmes axes de coordonnées, on porte en abscisses

les temps et en ordonnées les valeurs de la tension correspondante, on obtient la courbe de la tension en fonction du temps.

Pour les courants industriels, la boucle positive de chaque courbe peut se superposer exactement sur la boucle négative voisine, par glissement le long de l'axe des abscisses d'une longueur représentant une demi-période et par rotation de 180° autour de l'axe des abscisses. Si en outre chaque boucle est symétrique par rapport à l'ordonnée équidistante de deux zéros voisins, nous dirons que le courant est *symétrique* ; les courbes 1, 2 sont symétriques, les courbes 3 et 4 ne le sont pas. Cette condition est sensiblement réalisée industriellement, surtout pour la tension. (Les courbes présentent une dissymétrie à cause de l'hystérésis).

50. Intensité efficace. — On a une idée assez exacte de l'intensité d'un courant alternatif en sachant quelle est l'intensité du courant continu qui dégagerait la même quantité de chaleur dans le même fil et dans le même temps.

On appelle *intensité efficace* d'un courant alternatif, l'*intensité du courant continu qui produit le même dégagement de chaleur dans le même temps et dans la même résistance.*

Soient r la résistance du circuit, i l'intensité du courant alternatif qui le parcourt pendant le temps infiniment petit dt ; l'énergie calorifique dégagée pendant ce temps dt est exprimée par ri^2dt ; pendant la période T, l'énergie dégagée est égale à la somme des énergies dégagées pendant les divers intervalles dt en lesquels on peut décomposer le temps T, c'est-à-dire à la somme de tous les produits élémentaires ri^2dt qui correspondent à chacune des durées dt ; nous désignerons cette somme par $\int_T ri^2dt$. Si l'on désigne par I_e l'intensité du courant continu qui produit le même dégagement de chaleur dans le même circuit pendant le même temps T, on a : $\int_T ri^2dt = rI_e^2\,T$.



La résistance r, étant la même pour tous les éléments de la somme, peut se mettre en facteur commun ; on a par suite :

$$\int_T i^2\,dt = I_e^2\,T$$

d'où :

$$I_e^2 = \frac{1}{T}\int_T i^2\,dt$$

$\frac{1}{T}\int_T i^2\,dt$ s'appelle le carré moyen de l'intensité du courant ; il en résulte cette nouvelle définition de l'intensité efficace :

L'intensité efficace d'un courant alternatif est égale à la racine carrée du carré moyen de l'intensité du courant.

Il vient naturellement à l'idée de mesurer l'intensité efficace par le dégagement de chaleur dans un même fil.

Cette mesure se fait facilement au moyen d'un ampèremètre thermique tel que celui de Hartmann et Braun (§ 12).

Pour chaque déviation de l'aiguille sur le cadran, on a, par une détermination préalable, mesuré et noté sur l'appareil l'intensité du courant continu qui produit cette déviation ; le courant alternatif qui fait dévier l'aiguille du même angle que le courant continu de 1 ou 2 ou n ampères, a une intensité efficace de 1 ou 2 ou n ampères ; il dégage, en effet, la même puissance calorifique (§ 12).

51. Tension et voltage efficaces. — Il est en général inutile de connaître la courbe de la tension ; il suffit de connaître la tension efficace aux bornes A et B.

Par définition, *la tension efficace est la racine carrée du carré moyen de la tension pendant une période* :

Elle est définie par l'égalité

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{T}\int_T v^2\,dt}$$

Si la tension v est évaluée en volts, V_e est le *voltage efficace.*

La tension efficace se mesure en volts par le voltmètre de Lord Kelvin qui a été décrit § 19.

Quand un courant quelconque, continu ou alternatif, passe dans le segment A B, il y a, entre les équipages fixe et mobile *m* et *m'* du voltmètre, une force dite électrostatique, qui, pour une position relative déterminée des plaques *m* et *m'*, est proportionnelle au carré de la tension entre les points A et B.

Si la tension est constante et égale à V_e, le moment du couple qui s'exerce entre *m* et *m'* peut donc s'écrire :

$$(1) \qquad C = K\ V_e^2$$

K étant un coefficient dont la valeur est déterminée pour une position relative déterminée des équipages du voltmètre.

Ce couple est équilibré par la torsion du fil quand le couple de torsion est égal au couple C ; l'aiguille *a* de l'équipage mobile prend une position bien déterminée devant le cadran gradué.

Le courant alternatif, produisant un voltage variable d'un instant à l'autre, exerce sur l'équipage mobile du voltmètre un couple qui varie proportionnellement à V^2, mais qui garde toujours le même sens.

On démontre d'autre part, en mécanique, qu'une force constante, égale à la valeur moyenne d'une force variant périodiquement entre deux valeurs fixes, produit sur un équipage mobile le même effet que la force variable, si le déplacement de l'équipage est négligeable pendant une période de variation de la force variable. C'est le cas qui nous occupe; dans ses oscillations le voltmètre ne se déplace pas d'une façon sensible pendant une période. La valeur moyenne du couple agissant par le fait du courant alternatif est :

$$(2) \quad C_m = \frac{1}{T}\int_T C\,dt = \frac{1}{T}\int_T KV^2 dt$$

Si le courant alternatif dévie l'équipage mobile du même angle

que le courant de tension constante V_e, le coefficient K qui figure dans les formules (1) (2) sera le même.

De plus C_m et C équilibrent le même couple de torsion, on a

$$C = C_m$$

et par conséquent
$$V_e = \frac{1}{T}\int_T V^2 dt$$

Le voltage du courant continu, qui produit la même déviation de l'équipage mobile du voltmètre que le courant alternatif, est égal au voltage efficace du courant alternatif.

Si, par une graduation préalable, on a mesuré et noté pour chaque déviation du voltmètre le voltage du courant continu qui l'a produite, la lecture de la déviation résultant du passage d'un courant alternatif donne immédiatement le voltage efficace entre les bornes du circuit.

52. Force électromotrice efficace. — La force électromotrice qui réside dans un circuit peut être décomposée en plusieurs forces électromotrices partielles dont elle est la somme algébrique.

Pour chacune d'elles, *la force électromotrice efficace est, par définition, égale à la racine carrée du carré moyen de la force électromotrice e pendant une période.*

$$E_e = \sqrt{\frac{1}{T}\int_T e^2 dt}$$

53. Champ magnétique efficace. — On appelle champ magnétique efficace, la racine carrée du carré moyen du champ variable produit par le courant alternatif dans une direction donnée; on appellerait de même flux efficace à travers une surface, le produit de la surface par la composante normale du champ efficace.

CHAPITRE VI

RELATIONS ENTRE LE COURANT ET LA TENSION OU LA FORCE ÉLECTROMOTRICE. — DÉCALAGE

54. Équation du courant alternatif dans une bobine. — Self-induction. — Lorsqu'un courant constant traverse une bobine, la tension entre ses bornes est donnée par la loi de Ohm (3) § 17 : $V = ri$

Si le courant est variable, le circuit est en outre le siège d'une force électromotrice d'induction.

En effet un courant qui passe dans un circuit crée des lignes de force (§ 26). L'aire limitée par le circuit est traversée par un flux propre Φ_p. Si le sens positif du courant est choisi, le signe du flux propre Φ_p est déterminé § 31, 3e règle.

La bobine parcourue par un courant variable est le siège d'une force électromotrice d'induction propre ou de self-induction

$$e = -\frac{d\Phi_p}{dt}$$

Le circuit est dit inductif.

La tension aux bornes étant donnée par la relation (4) § 18 :

$$V = ri - e$$

on a

$$V = ri + \frac{d\Phi_p}{dt}$$

$+\frac{d\Phi_p}{dt}$ est la force contrélectromotrice de self-induction. Désignons-la par e'

on a

$$V = ri + e'$$

La tension aux bornes d'une bobine parcourue par un courant alternatif est égale à la somme de la chute ohmique de tension et de la force contrélectromotrice de self-induction.

55. Relation du flux propre et du courant. — Le flux propre d'une bobine présente cette particularité que, étant produit par le courant, il pénètre toujours par la face droite de ce courant.

Si le courant réel est dirigé dans le sens pour lequel on lui donne le signe positif, le flux pénètre par la face droite du courant positif et est positif. Si le courant est dirigé en sens contraire, on lui donne le signe négatif : le flux créé pénètre par la face droite du courant négatif, qui est la face gauche relative à un courant positif et le flux est négatif (§ 31). Le flux propre est donc toujours de même signe que le courant ; de plus, il croît toujours avec le courant : il est donc *maximum avec lui.*

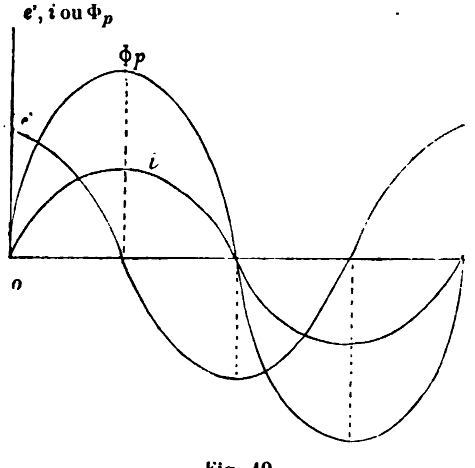


Fig. 19.

Si le circuit ne contient pas de fer, le flux produit par le courant est nul avec lui ; s'il contient du fer très doux, il en est encore sensiblement ainsi ; le courant et le flux *sont nuls simultanément.*

Si i représente la courbe du courant en fonction du temps, Φ_p représente la courbe du flux propre de la bobine (fig. 19).

On peut de même tracer la courbe de la force contrélectromotrice e'.

$\frac{d\,\Phi_p}{dt}$ représente, en effet, la tangente trigonométrique de l'angle que fait une tangente géométrique donnée avec l'axe des abscisses à l'instant t ; d'autre part, $\frac{d\Phi_p}{dt}$ est nul quand i est

maximum, et maximum ou minimum quand i est nul (dans le cas d'une *courbe symétrique*).

La courbe représentative de la force contrélectromotrice de self-induction : $e' = + \frac{d\Phi_p}{dt}$ est donc la courbe e' (fig. 19).

56. Périodicité de la tension et du courant. — Si i est périodique, la chute ohmique de tension, le flux et la force contrélectromotrice sont périodiques de même période que i.

On peut tirer de là cette conclusion :

La tension aux bornes de la bobine étant la somme de deux termes ri et $\frac{d\Phi_p}{dt}$ qui reprennent respectivement la même valeur au bout de temps égaux à leur période commune T, *la tension aux bornes d'une bobine est une fonction périodique de même période que le courant qui la parcourt.*

57. Décalage. — En général, la tension et le courant ne sont pas nuls au même instant.

Si on a $$V = ri + e'$$

V et i ne seront nuls simultanément que si e' est nul avec i.

Appelons *zéros homologues* de la tension et du courant, les zéros par lesquels ces deux grandeurs passent toutes les deux en croissant ou toutes les deux en décroissant.

On appelle *décalage de la tension et du courant, la durée qui sépare un zéro de la tension du zéro homologue le plus voisin du courant.*

Si θ est le décalage (voir fig. 20) et T la période, on appelle *angle de décalage*, le produit $2\pi\frac{\theta}{T}$.

Cette définition est précise pour les courants industriels, car ils n'ont que deux zéros par période et leur boucle positive est toujours superposable sur leur boucle négative (§ 49).

On dit que la tension est en *avance* sur le courant, si la tension



est déjà positive au moment où le courant passe par zéro en croissant ; dans ce cas le courant est dit en *retard* sur la tension. C'est le cas de la figure 20.

Dans le cas d'une bobine parcourue par un courant alternatif, la force contrélectromotrice e' est positive quand le courant est nul, la tension est donc en avance sur le courant.

On peut considérer le décalage de deux grandeurs périodiques quelconques ; on appellera décalage, la durée qui sépare leurs deux zéros homologues les plus voisins.

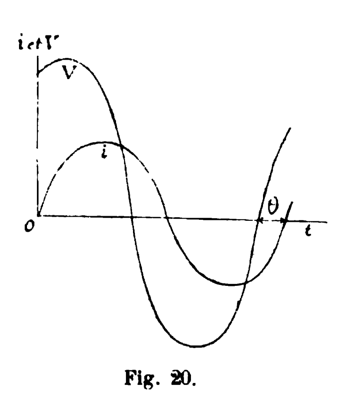


Fig. 20.

On dira qu'une force électromotrice ou contrélectromotrice est décalée en avance par rapport au courant, si cette force électromotrice ou contrélectromotrice est déjà positive quand le courant passe par zéro en croissant ; elle est en retard, si le courant est déjà positif à l'instant où la force électromotrice ou contrélectromotrice passe par zéro en croissant.

Si on a $$V = ri + e'$$

V est en avance ou en retard sur le courant, suivant que e' est en avance ou en retard sur ce dernier.

Dans la définition précédente, le décalage est toujours compris entre o et $\frac{T}{2}$; il est une avance ou un retard du courant sur la tension ou sur la force électromotrice ou inversement.

On peut considérer aussi que la tension est toujours en avance sur le courant à condition de compter les avances de o à T ; une avance supérieure à $\frac{T}{2}$ est dans ce cas identique à un retard de la tension sur le courant dans notre première manière de voir ; c'est à celle-ci que nous allons nous tenir en général.

58 Résistance sans self-induction. — La grandeur du décalage entre la tension et le courant dépend de la valeur relative des maxima de la chute ohmique de tension dans le circuit et de la force contrélectromotrice.

Si le maximum de la force contrélectromotrice de self-induction est nul ou négligeable devant celui du terme ri, on a un *circuit* ou une *résistance sans self-induction.*

Le zéro de la tension coïncide alors avec le zéro du courant : le courant et la tension sont dits en concordance de phase, *leur décalage relatif est nul.*

On réalise facilement une résistance sans self-induction en disposant un fil en zig-zag, de façon qu'un segment de fil parcouru par un courant dans un sens soit toujours le plus voisin possible d'un segment parcouru par le courant en sens contraire.

Pratiquement, des lampes à incandescence sont des résistances sans self-induction.

Entre les bornes d'une résistance sans self-induction, on a à chaque instant :

$$(1) \qquad V = ri$$

et puisque r est constant, on a la même égalité entre les grandeurs efficaces.

En effet : $V_e = \sqrt{\frac{1}{T}\int_T r^2 i^2 dt}$

et puisque r est constant :

$$V_e = r\sqrt{\frac{1}{T}\int_T i^2\, dt}$$

d'où

$$(2) \qquad V_e = ri_e$$

La tension efficace aux bornes d'une résistance sans self-induction est égale au produit de la résistance par l'intensité efficace du courant.

Si l'intensité est évaluée en ampères, la résistance en ohms, la tension est évaluée en volts. Une résistance de 10 ohms

parcourue par un courant alternatif d'une intensité efficace de 20 ampères, a entre ses bornes une tension ou voltage efficace de $10 \times 20 = 200$ volts.

On fait varier le courant, dans un circuit aux bornes duquel on maintient une tension efficace constante, en faisant varier sa résistance.

De même, on fait varier la tension aux bornes d'un circuit traversé par un courant efficace constant, en faisant varier sa résistance.

Un circuit de résistance variable est un *rhéostat.*

59. Bobine de self-induction. — Lorsqu'une bobine a une résistance nulle, le courant est maximum quand la tension est nulle ; le courant est en retard sur la tension d'un quart de période.

Une telle bobine s'appelle *une bobine de self-induction.*

Une résistance ne peut jamais être nulle ; mais pratiquement, une bobine quelconque à gros fil de cuivre introduit dans l'expression de la tension un terme *ri*, dont la valeur maximum est très petite par rapport à celle de la force contrélectromotrice de self-induction ; le maximum de cette dernière correspond pratiquement avec le maximum de la tension et, par suite, le zéro de la tension avec le maximum du courant.

Il en est *à fortiori* ainsi pour une bobine de petite résistance à noyau de fer doux.

Entre les bornes de la bobine, on a, à chaque instant :

$$V = \frac{d\,\Phi_p}{dt}$$

La tension efficace aux bornes est :

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{T}\int_T \left(\frac{d\,\Phi_p}{dt}\right)^2 dt}$$

pour un même courant dans la bobine, le flux est proportionnel à la perméabilité du milieu dans les conditions de l'expérience

(§ 38); il en est de même du taux de variation du flux $\frac{d\Phi_p}{dt}$. Pour un même courant périodique dans la bobine, la tension efficace est donc proportionnelle à la perméabilité du milieu si celle-ci est constante pour les inductions inférieures à 5.000 gauss; dans le cas général elle est d'autant plus grande que le noyau de fer remplit mieux la bobine.

Or (§ 38 et 41), le flux développé par un courant est augmenté par la présence du fer dans le rapport de 1 à 2000; on peut donc faire varier la tension efficace aux bornes d'une bobine dans de très larges limites, en y enfonçant plus ou moins un noyau de fer doux. Si l'on maintient une tension efficace constante aux bornes d'un circuit comprenant un récepteur et une bobine de self en série, on peut par cette dernière faire varier dans de très larges limites la tension aux bornes du récepteur et le courant qu'il absorbe.

Une bobine de self-induction permet donc de régler le courant et la tension comme un rhéostat.

60. Courant de condensateur. — Nous avons vu que la charge prise par un condensateur, dont les armatures sont réunies aux deux extrémités d'un circuit entre lesquelles existe une tension V, est (§ 21)

$$Q = C V$$

Nous admettrons que cette formule reste vraie quand la tension est variable.

Les conducteurs, qui réunissent les armatures du condensateur aux bornes du circuit, sont traversés par un courant variable.

Si la tension augmente de dV, la charge augmente de dQ, telle que l'on ait (§ 21) :

$$(3) \quad dQ = C\,dV$$

Un courant parcourt la branche qui contient le condensateur;

son intensité i pendant le temps dt est (§ 7 et § 60 (3)) telle que :

$$dq = i\,dt = C\,dV$$

d'où

$$i = \frac{C\,dV}{dt}$$

Ce courant est nul quand la tension est maximum ou minimum; il est positif quand la tension croît, négatif quand elle décroît, maximum quand elle est nulle, si la tension est symétrique.

Ce courant est donc décalé d'un quart de période, en avance sur la tension.

CHAPITRE VII

PUISSANCE DES COURANTS ALTERNATIFS

61. Puissance instantanée d'un courant alternatif. — Le décalage du courant par rapport à la tension ou à la force électromotrice joue, en courant alternatif, un rôle très important.

Soient (i) la courbe du courant et (V) la courbe de la tension en fonction du temps (dans le cas de la figure 20, la tension est en avance sur le courant).

Quand le courant a le même sens que celui qu'y engendrerait la tension seule suivant la loi d'Ohm (§ 17), v et i sont de même signe, la puissance dégagée est positive; une puissance équivalente est communiquée aux corps extérieurs, le circuit est bien un récepteur d'énergie.

Lorsque le courant a le signe contraire de la tension, c'est-à-dire lorsque le courant est de sens contraire à celui qu'y ferait circuler la tension suivant la loi d'Ohm, la puissance dégagée est négative, c'est-à-dire que le courant électrique absorbe de l'énergie qu'il

enlève aux corps extérieurs et transforme en énergie électrique dans son propre circuit qui devient ainsi un générateur d'énergie.

Si on se rapporte à la définition des zéros homologues du courant et de la tension du § 57, on peut dire qu'entre deux zéros voisins homologues de la tension et du courant (fig. 20) le circuit fonctionne comme un générateur transformant en énergie électrique l'énergie utilisable qu'il emprunte aux corps extérieurs; entre deux zéros voisins non homologues, le circuit fonctionne comme un récepteur dégageant l'énergie électrique pour la communiquer sous une forme utilisable aux corps extérieurs.

Un circuit traversé par un courant alternatif, décalé par rapport à la tension entre ses bornes, fonctionne donc comme un volant de machine à vapeur, absorbant l'énergie pendant la course avant du piston, la restituant pendant la course de retour.

62. Puissance moyenne dégagée dans un circuit.— La puissance moyenne dégagée, dans un circuit parcouru par un courant alternatif, est l'excès de la puissance dégagée par le circuit quand il fonctionne comme récepteur sur la puissance absorbée quand il fonctionne comme générateur ; on peut la mettre sous la forme suivante.

Soit un temps dt assez court pour qu'on puisse considérer les variations relatives de l'intensité i et de la tension v comme négligeables ; l'énergie dégagée pendant ce temps est $vidt$; pendant les divers temps dt en lesquels on pourra décomposer la période T, on aura des termes analogues. L'énergie dégagée pendant la période T sera égale à la somme des énergies dégagées pendant chacun des temps dt de la période, somme que l'on écrira :

$$\int_T vi\,dt.$$

Si on appelle puissance moyenne disponible dans le circuit,

l'énergie dégagée dans le circuit par unité de temps, la puissance moyenne est représentée par

$$P_m = \frac{1}{T}\int_T vidt.$$

La puissance moyenne s'appelle aussi puissance *réelle* ou *utile.*

63. Variation de la puissance moyenne dégagée avec le décalage. — 1° *Pour un courant et une tension de courbes données, la puissance dégagée dans un circuit décroît d'une façon continue quand le décalage du courant sur la tension croît de zéro à* $\frac{T}{2}$; 2° *elle est nulle pour le décalage* $\frac{T}{4}$; 3° *le maximum pour le décalage nul est égal en valeur absolue au minimum négatif pour le décalage* $\frac{T}{2}$ (¹).

Nous supposerons, pour rendre la démonstration plus élémentaire, que les courbes du courant et de la tension sont symétriques et sans dentelures.

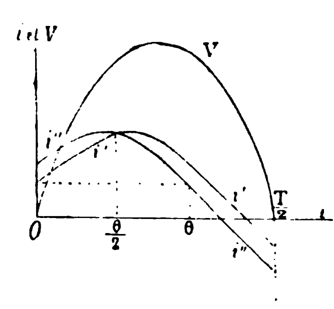


Fig. 21.

Soient V la courbe des tensions et i' et i'' deux courbes de courant décalées toutes deux en avance sur la tension et i'' plus décalée que i' (fig. 21).

1° Divisons la durée en temps élémentaires égaux dt et faisons pour chacun des courants i' et i'' la somme des produits *vidt* pour une demi période ; nous allons démontrer que pour i' cette somme est plus grande que pour i''.

Comptons les temps à partir d'un zéro de la tension ; soit i'_0 l'intensité du courant le moins décalé à l'instant zéro ; le courant i'' le plus décalé atteindra cette même valeur en décroissant, à l'instant θ (fig. 21); à cause de la symétrie du courant, les deux cou-

(¹) Dans une première lecture on peut passer la démonstration de ce théorème et ne retenir que les résultats.

rants i' et i'' prennent les mêmes valeurs à l'instant $\frac{\theta}{2}$ et, pour deux temps dt également éloignés de part et d'autre de l'instant $\frac{\theta}{2}$, les différences $a = i'' - i'$ sont égales et de signe contraire.

Divisons l'intervalle de zéro à θ en $2n + 1$ temps élémentaires dt égaux, numérotés de 0 à $2n$; le temps élémentaire correspondant à $\frac{\theta}{2}$ a le numéro n, les intensités et les tensions ont les valeurs suivantes:

à l'instant	0	$i'_0 = i''_0 - a_0$	$v = v_0$	
id.	$n - p$	$i'_{n-p} = i''_{n-p} - a_{n-p}$	$v = v_{n-p}$	
id.	n	$i'_n = i''_n$	$v = v_n$	(A)
id.	$n + p$	$i'_{n+p} = i''_{n+p} + a_{n-p}$	$v = v_{n+p}$	
id.	$2n$	$i'_{2n} = i''_{2n} + a_0$	$v = v_{2n}$	

Dans ce tableau les quantités a sont toutes positives.

Formons la différence

$$\left(v_0\, i'_0\, dt \ldots + v_{2n}\, i'_{2n}\, dt\right) - \left(v_0\, i''_0\, dt + \ldots + v_{2n}\, i''_{2n}\, dt\right)$$

elle peut s'écrire

$$v_0\left(i'_0 - i''_0\right) dt + \ldots + v_{2n}\left(i'_{2n} - i''_{2n}\right) dt$$

et d'après les relations (A)

$$- v_0\, a_0\, dt - \ldots - v_{n-p}\, a_{n-p}\, dt + v_{n+p}\, a_{n-p}\, dt + \ldots + v_{2n}\, a_0\, dt$$

c'est-à-dire

$$a_0\left(v_{2n} - v_0\right)dt + a_1\left(v_{2n-1} - v_1\right)dt + \ldots + a_{n-1}\left(v_{n+1} - v_{n-1}\right)dt$$

cette dernière somme est manifestement positive tant que le décalage de i'' est inférieur à $\frac{T}{2}$.

Ainsi donc entre l'instant zéro et l'instant θ la somme des termes $vidt$ est la plus grande pour le courant le moins décalé ; il en est encore ainsi entre l'instant θ et $\frac{T}{2}$; ceci est évident, car i'—i'' est constamment positif pour un même temps dt.

La puissance décroît donc d'une façon continue, lorsque le décalage croît de zéro à $\frac{T}{2}$ et elle est maximum pour le décalage nul.

2° Lorsqu'un courant présente un décalage de $\frac{T}{4}$ par rapport à la tension, la puissance moyenne dégagée est nulle ; en effet, pour deux temps *dt* également éloignés de l'instant du maximum de la tension, les termes *vidt* sont égaux et de signe contraire ; l'énergie dégagée pendant un quart de période est entièrement absorbée pendant le quart de période suivant.

3° Pour le décalage de $\frac{T}{2}$, la valeur absolue du minimum de la puissance est égale à la puissance maximum correspondant au décalage nul : il suffit de remarquer pour le voir, que deux courants symétriques et identiques, décalés l'un par rapport à l'autre d'une demi période, sont à chaque instant égaux et de signe contraire ; à un terme *vidt* du premier correspond un terme égal et de signe contraire pour le second.

La troisième partie de la proposition est vraie pour tous les courants industriels, quelle que soit leur forme ; la deuxième est aussi générale mais avec cette légère restriction que, pour les courants dissymétriques, la puissance dégagée est nulle pour un décalage *très voisin* de $\frac{T}{4}$; la première s'étend au cas où la courbe est dissymétrique mais régulière, elle n'est qu'approchée dans le cas de courbes dentelées.

En résumé, quand le décalage (avance ou retard) du courant sur la tension croît d'une façon continue de zéro jusqu'à $\frac{T}{4}$, le circuit fonctionne comme récepteur ; la puissance moyenne dégagée, maximum pour le décalage nul, décroît d'une façon continue pour s'annuler pour un décalage $\frac{T}{4}$.

Si le décalage croît de $\frac{T}{4}$ à $\frac{T}{2}$ la puissance moyenne dégagée devient négative ; le circuit fonctionne comme un générateur. La puissance absorbée dans le générateur varie suivant la même loi que la puissance dégagée dans un récepteur ; elle est nulle pour un décalage de $\frac{T}{4}$, croît d'une façon continue avec le décalage et

atteint pour un décalage de $\frac{T}{2}$ un maximum égal à la puissance maximum dégagée comme récepteur.

Tout circuit traversé par un courant alternatif, dans lequel on peut faire varier le décalage (avance ou retard) du courant par rapport à la tension de 0 à $\frac{T}{2}$, pourra donc fonctionner successivement comme récepteur et générateur.

Tout circuit, où ce décalage ne peut varier qu'entre les valeurs zéro et $\frac{T}{4}$, pourra fonctionner comme un récepteur à puissance variable.

64. Facteur de puissance. Puissance apparente. — La puissance moyenne dégagée ou absorbée dans un circuit n'est pas définie par la seule connaissance de l'intensité efficace et de la tension efficace ; elle peut s'exprimer par le produit :

$$P = V_e I_e f$$

V_e et i_e étant la tension et l'intensité efficaces et f un facteur appelé facteur de puissance qui est égal à l'unité pour un décalage nul ou $\frac{T}{2}$ et égal à 0 pour un décalage de $\frac{T}{4}$.

On appelle puissance apparente dans un circuit, *le produit de la tension efficace par l'intensité efficace.*

Si on divise la puissance réelle P par la puissance apparente P_a on a

$$f = \frac{P}{P_a}$$

Le facteur de puissance est le quotient de la puissance moyenne par la puissance apparente.

Cas particuliers. — *Dans une résistance sans self-induction, la puissance dégagée est égale au produit de la tension efficace entre ses bornes par l'intensité efficace du courant qui la parcourt.* En effet, par définition de l'intensité efficace, la puissance calorifique dégagée dans un circuit de résistance r est $r\, i_e^2$; or, puisque (2) (§ 58)

$$r\, i_e = V_e,$$

on a donc

$$P = V_e\, i_e.$$

Le facteur de puissance d'une résistance sans self-induction est égal à l'unité.

La puissance électrique moyenne absorbée par une bobine de self-induction sans résistance ni hystérésis est nulle, le décalage est de $\frac{T}{4}$ entre la tension et le courant, il en résulte *qu'une bobine de self-induction permet de régler la tension aux bornes d'un circuit sans dépense d'énergie*. Son facteur de puissance est égal à zéro.

65. Puissance moyenne absorbée ou dégagée relative à une force électromotrice. — La puissance totale dégagée dans un circuit est égale à la somme algébrique des puissances dégagées relatives à chacune des forces électromotrices qui existent dans le circuit.

Dans un circuit dont la tension aux bornes est donnée par la relation :

$$v = ri + e'$$

la puissance moyenne dégagée est égale à la somme des puissances dégagées relative à la chute ohmique ri et à la force contrélectromotrice e'.

La puissance moyenne absorbée relative à une force électromotrice e est $\frac{1}{T}\int_T eidt$; pour les mêmes courbes de force électromotrice et de courant, la puissance absorbée varie avec le décalage suivant une loi analogue à celle que l'on a établie pour la puissance totale (§ 63). La force électromotrice de self-induction étant décalée d'un quart de période par rapport au courant, la puissance moyenne qui lui correspond est nulle ; une bobine de self-induction de résistance r absorbe uniquement une puissance électrique égale à l'effet Joule (en faisant abstraction de l'hystérésis et des courants de Foucault).

66. Courants wattés et déwattés. — Au lieu de décomposer la tension en termes partiels correspondant à une absorption

ou à un dégagement d'énergie pour un même courant, on a eu l'idée de conserver la tension réellement appliquée entre les bornes du circuit, et de considérer le courant comme formé par la superposition de deux courants partiels : l'un toujours proportionnel à la tension, absorbant ou dégageant par période la même énergie que le courant total, on l'appelle le *courant watté;* l'autre, décalé d'un quart de période sur la tension, absorbant dans un quart de période l'énergie qu'il dégage dans le quart de période suivant, c'est le *courant déwatté.*

Les phénomènes qui dégagent ou absorbent une puissance moyenne par période qui n'est pas nulle, peuvent être considérés comme produits par des courants wattés : le travail d'un moteur, l'effet Joule, l'hystérésis, les courants de Foucault, les frottements mécaniques demandent des courants wattés.

Les phénomènes qui dégagent ou absorbent une puissance moyenne nulle par période, peuvent être considérés comme produits par le courant déwatté.

Si on fait abstraction de l'hystérésis, l'aimantation d'un noyau de fer doux ou d'un milieu quelconque se produit en un quart de période et sa désaimantation pendant le quart de période suivant; la charge d'un condensateur se produit en un quart de période, sa décharge dans le quart de période suivant.

L'aimantation et la désaimantation d'un milieu, la charge et la décharge d'un condensateur nécessitent des courants déwattés.

Le courant déwatté magnétisant d'une bobine de self est décalé d'un quart de période en retard, et le courant de charge d'un condensateur, d'un quart de période en avance sur la tension entre les bornes de la bobine ou entre les armatures du condensateur.

Pour une même aimantation maximum de deux noyaux de fer doux et une même tension, l'énergie nécessaire pour l'aimanta-



tion et par suite le courant déwatté magnétisant est proportionnel au volume du fer.

67. Propriétés principales des courants wattés et déwattés. — Soient I, i, j, v, les courants total, watté et déwatté et la tension aux bornes du circuit parcouru par ce courant (fig. 22). On a à chaque instant par définition

$$(1) \qquad I = i + j$$

et

$$(2) \qquad i = k\,v$$

il résulte de (1) que i est maximum avec v si k est positif, et minimum quand v est maximum, si k est négatif.

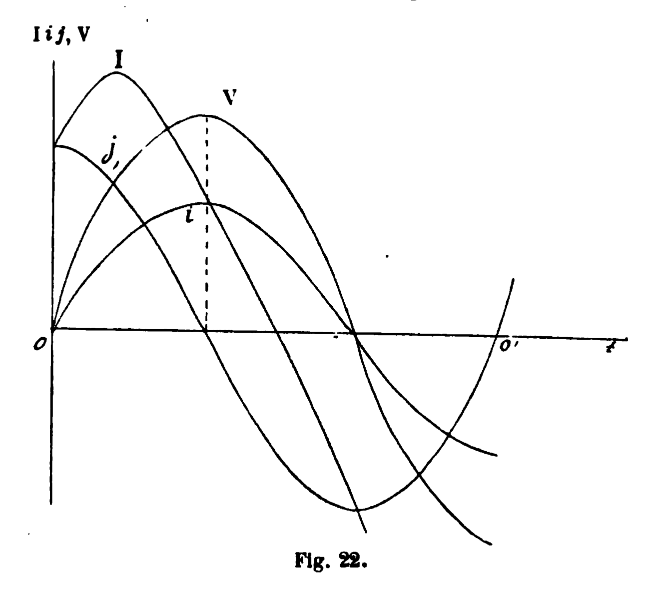


Fig. 22.

Dans le premier cas, le décalage entre le courant watté et la tension est nulle ; ces grandeurs sont en concordance de phase ; dans le deuxième cas, le décalage est d'une demi-période.

1° Avec cette définition des courants wattés et déwattés, cherchons la puissance dégagée dans un circuit.

La puissance absorbée pendant une période T est la somme des

termes *vidt* que l'on peut former pour chaque durée élémentaire *dt*; or

$$i = kv$$

$$vidt = kv^2\, dt$$

et la puissance moyenne dégagée sera

$$w = \frac{1}{T}\int_T vidt = \frac{1}{T}\int_T kv^2dt$$

mais *k* est constant, il a la même valeur pour tous les éléments de la somme, on peut mettre *k* en facteur commun et écrire

$$(3) \qquad w = k.\frac{1}{T}\int_T v^2dt = k\,V_e^2$$

en remplaçant *v* par $\frac{i}{k}$, dans chacun des termes *vidt* de la somme, on aurait pareillement

$$(4) \qquad w = \frac{1}{T}\int_T \frac{i^2dt}{k} = \frac{1}{k}\,\frac{1}{T}\int_T i^2dt = \frac{i_e^2}{k}$$

en multipliant membre à membre (3) et (4) on a

$$w^2 = V_e^2\, i_e^2$$

c'est-à-dire (5) $w = V_e\, i_e$

La puissance dégagée dans un circuit parcouru par un courant alternatif est égale au produit de la tension efficace aux bornes du circuit par l'intensité efficace du courant watté.

Le coefficient *k* se déduit de (1), si on se donne la puissance à dégager et la tension efficace aux bornes du circuit.

2° Par définition on a

$$W = \frac{1}{T}\int_T vIdt = \frac{1}{T}\int_T vidt + \frac{1}{T}\int_T vjdt.$$

En tenant compte de (3) on a donc

$$(6) \qquad \frac{1}{T}\int_T vjdt = o.$$

Le courant déwatté absorbe une puissance moyenne nulle.

3° On a

$$I^2 = i^2 + j^2 + 2ij.$$

$$\frac{1}{T}\int_T I^2 dt = \frac{1}{T}\int_T i^2 dt + \frac{1}{T}\int_T j^2 dt + \frac{1}{T}\int_T 2ij dt$$

mais $i = k v$.

La somme

$$\frac{1}{T}\int_T ij dt = k \frac{1}{T}\int_T vj dt.$$

elle est nulle d'après (6).

On a donc si I_e, i_e, j_e désignent les courants efficaces total, watté et déwatté

$$I_e^2 = i_e^2 + j_e^2.$$

Règle des vecteurs. — *Si on convient de figurer les courants efficaces watté et déwatté par des vecteurs rectangulaires l'un sur l'autre, numériquement égaux aux courants efficaces watté et déwatté, le courant efficace total est numériquement égal à l'hypoténuse du triangle rectangle construit sur les deux vecteurs.*

Appelons *angle de phase ou déphasage*, l'angle φ fait par le vecteur représentatif du courant watté avec celui du courant total

$$i_e = I_e \cos.\varphi$$

la puissance dégagée dans le circuit est

$$P = V_e I_e \cos.\varphi$$

Le facteur de puissance d'un courant alternatif est donc égal au cosinus de l'angle de phase.

Si les courbes du courant sont des sinusoïdes, l'angle de phase est égal à l'angle de décalage (§ 57). Dans la grande majorité des cas, les courbes n'ont pas la forme sinusoïdale ; le facteur de puissance, $\cos.\varphi$, est égal au produit du cosinus de l'angle de décalage, par un facteur appelé *facteur de forme*, qui dépend de la forme de la courbe du courant.

CHAPITRE VIII

MESURE DE LA PUISSANCE DÉGAGÉE PAR UN COURANT ALTERNATIF QUELCONQUE

68. Méthode des trois voltmètres. — On peut mesurer la puissance dégagée par un circuit quelconque mobile ou immobile.

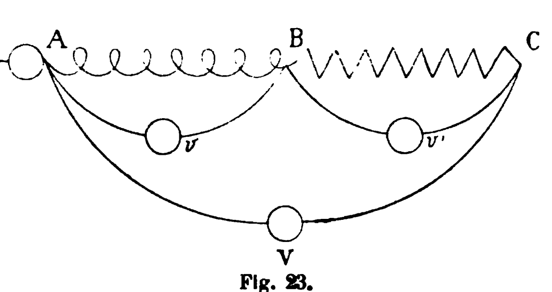


Fig. 23.

Soit un circuit quelconque AB (fig. 23) ; plaçons en série avec ce circuit, une résistance sans self, un tableau de lampes à incandescence BC par exemple ; plaçons un voltmètre v entre les extrémités A et B du circuit, un second voltmètre v' entre les extrémités B et C de la résistance sans self, un troisième V entre l'extrémité A du circuit et l'extrémité C de la résistance sans self, enfin un ampèremètre A, en un point quelconque de la ligne.

La puissance à mesurer est :

$$(1) \qquad P = \frac{1}{T}\int_T vidt$$

(v étant la tension entre les extrémités A et B du circuit et i l'intensité du courant qui le parcourt).

Si nous appelons v' et V les tensions entre les extrémités B et C, et entre les extrémités A et C, nous pouvons écrire (§ 16) :

$$(2) \qquad V = v + v' \cdot$$

D'autre part, la résistance r' de BC étant sans self, on a à chaque instant (§ 58) :

$$(3) \qquad v' = r'i$$

$$\text{d'où :} \qquad i = \frac{v'}{r'}$$

Si l'on transporte cette valeur de i dans chacun des termes $vidt$ de l'expression de la puissance, on a :

$$vidt = \frac{vv'}{r'} dt$$

L'égalité (2) donne :

$$V^2 = v^2 + v'^2 + 2vv'$$

$$\text{d'où} \qquad vv' = \frac{V^2 - v^2 - v'^2}{2}$$

$$\text{par suite} \qquad vidt = \frac{V^2 - v^2 - v'^2}{2r'} dt = \frac{V^2 dt}{2r'} - \frac{v^2 dt}{2r'} - \frac{v'^2 dt}{2r'}$$

$$\text{Donc P ou } \frac{1}{T}\int_T vidt = \frac{1}{T}\int_T \frac{V^2 dt}{2r'} - \frac{1}{T}\int_T \frac{v^2 dt}{2r'} - \frac{1}{T}\int_T \frac{v'^2 dt}{2r'}.$$

Or, en appelant V_e, v_e, v_e', les voltages efficaces, on a :

$$\frac{1}{T}\int_T V^2 dt = V_e^2, \text{ etc.}$$

$$\text{On a donc :} \qquad P = \frac{1}{2r'}\left[V_e^2 - v_e^2 - v_e'^2\right]$$

Pour connaître r' il suffit de connaître l'intensité efficace i_e' et le voltage v_e' aux bornes du circuit sans self,

$$\text{on a :} \qquad v_e' = r' i'_e$$

$$\frac{1}{r'} = \frac{i'_e}{v_e'}$$

$$\text{donc} \qquad P = \frac{1}{2}\frac{i_e'}{v_e'}(V_e^2 - v_e^2 - v_e'^2)$$

Dans une expérience on a trouvé

$V_e = 110^{\text{volts}}$; $v_e = 71^{\text{volts}}$; $v'_e = 62^{\text{volts}}$; $i'_e = 25^{\text{ampères}}$.

avec ces valeurs on trouve

$$P = 648 \text{ watts.}$$

Cette méthode, dite des trois voltmètres, a l'inconvénient d'exiger que l'on place un circuit sans self-induction en tension avec le circuit proposé, ce qui nécessite, pour mesurer une puissance donnée, l'emploi d'un alternateur pouvant fournir une tension supérieure à celle qui existe normalement entre les bornes du circuit.

69. Méthode des trois ampèremètres. — Pour éviter cet inconvénient on peut employer la méthode des trois ampèremètres.

On jette en dérivation, sur le circuit en expérience, une résistance sans self-induction (fig. 24) ;

Fig. 24.

on place un ampèremètre A sur le circuit principal, avant la bifurcation, un second a sur le circuit en expérience, un troisième a' sur la résistance auxiliaire, et un voltmètre entre les extrémités de cette dernière.

Soient I l'intensité du courant principal avant la bifurcation, i celle du courant dans le circuit en expérience et i' le courant dans la résistance auxiliaire ; on a à chaque instant, d'après le lemme de Kirchoff (§ 9) :

$$(4) \quad I = i + i'$$

si v désigne à un instant quelconque la tension entre les deux extrémités de la résistance auxiliaire r', supposée sans self,

on a $$v = r' i'$$

d'où $$v \, i \, dt = r' i i' \, dt$$

or, d'après l'égalité (4), on a :

$$i \, i' = \frac{I^2 - i^2 - i'^2}{2}$$

donc

$$\frac{1}{T}\int_T vidt = \frac{r'}{2}\left[\frac{1}{T}\int_T I^2 dt - \frac{1}{T}\int_T i^2 dt - \frac{1}{T}\int_T i'^2 dt\right]$$

et par suite $$P = \frac{r'}{2}\left[\ I^2_e - i^2_e - i'^2_e\ \right]$$

(les indices e signifiant qu'il s'agit des intensités efficaces)

or $$r' = \frac{v_e}{i'_e}$$

donc $$P = \frac{1}{2}\ \frac{v_e}{i'_e}\left[\ I^2_e - i^2_e - i'_e\ \right]$$

Dans une expérience

$$I_e = 30^{a.}\ ;\ i_e = 20^{a.}\ ;\ i'_e = 18{,}5^{a.}\ ;\ V_e = 110^{v.}.$$

on trouve $$P = 468 \text{ watts}$$

Les méthodes précédentes ont le grand avantage d'être générales ; elles reposent uniquement sur cette propriété que les courants sont périodiques, quelle que soit leur forme ; mais elles nécessitent quatre mesures et en particulier la lecture à un même instant de trois voltages ou de trois courants.

Dans la pratique industrielle on emploie une méthode plus rapide, la méthode du wattmètre.

70. Wattmètre. — Le wattmètre comprend deux circuits verticaux ; l'un fixe à gros fil et à faible résistance, l'autre mobile à fil fin et à grande résistance (fig. 25).

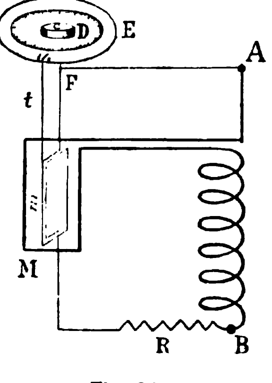


Fig. 25.

La bobine à fil fin m est suspendue à un fil métallique suspendu lui-même et fixé au centre d'un cercle gradué D horizontal, mobile par un bouton c autour de son centre. Une tige t, fixée au cadre mobile en fil fin, est terminée par une pointe qui se déplace devant un cercle fixe extérieur au précédent E.

Lorsque le fil est sans torsion et qu'aucun courant ne traverse

les cadres, le cadre mobile a ses spires normales au plan des spires de la bobine fixe M, et la pointe recourbée de la tige t se trouve sur un repère fixe du cercle fixe. Sous l'action des courants qui le traversent, le cadre m tourne ; on tord le fil de suspension F, en tournant convenablement le bouton c de façon à ramener m à sa position d'équilibre initiale.

La force qui agit sur le circuit mobile est proportionnelle au courant qui le traverse et au courant du cadre fixe ; par conséquent le moment du couple des forces électrodynamiques qui agissent sur le circuit mobile est de la forme :

$$C = GIi$$

I représentant le courant qui parcourt la bobine à gros fil, i le courant qui parcourt la bobine à fil fin et G, un coefficient qui dépend uniquement de la position relative, de la forme et du nombre de spires des deux circuits.

Il faut démontrer que cet appareil peut servir à mesurer la puissance dépensée dans un circuit.

Faisons traverser la bobine à gros fil par le courant qui parcourt le circuit en expérience, et plaçons en dérivation, sur les extrémités A et B de ce dernier, un circuit formé de la bobine à fil fin du wattmètre et d'une autre grande résistance sans self R servant à atténuer le courant (fig. 25).

Si v est la différence de potentiel entre les extrémités du circuit et r la résistance totale du circuit formé par la bobine à fil fin et par la résistance auxiliaire, on a dans le cas où l'on peut supposer nulle la self-induction : $v = ri$

par suite,
$$C = \frac{G\,v\,I}{r} = G'vI$$

en posant
$$\frac{G}{r} = G'$$

Le couple exercé est donc à chaque instant proportionnel au pro-

duit v I, c'est-à-dire à la puissance instantanée. En courant constant, la puissance et le couple sont constants; en courant alternatif, le couple sera variable et sa valeur moyenne

$$C_m = \frac{1}{T}\int_T G'vIdt$$

ou puisque G' est constant

$$C_m = G'\frac{1}{T}\int_T vIdt = G'P$$

$\frac{1}{T}\int_T vIdt$ représente la puissance moyenne P du courant alternatif, on a donc

$$C_m = G'P$$

or, le courant ayant une fréquence de 40 à 50 périodes par seconde, le couple varie avec une fréquence de 80 à 100 périodes par seconde ; ces variations sont si rapides, que le cadre mobile m n'a pas le temps de se déplacer d'une façon sensible pendant une demi période ; le cadre m, soumis à ce couple rapidement variable, prend la même position d'équilibre que s'il était soumis au couple constant égal au couple moyen $C_m = G'P$.

Lorsqu'on a ramené le cadre mobile m à sa position d'équilibre initiale, par une torsion d, le couple de torsion fait équilibre au couple électrodynamique ; comme le premier est proportionnel à l'angle de torsion α et le second à la puissance moyenne, on a

$$P = k\alpha$$

k est la constante du wattmètre. On la détermine avec un courant constant dont on mesure la tension et l'intensité par un voltmètre et un ampèremètre ce qui donne la puissance ; le wattmètre étant branché en même temps, la lecture de la torsion α donne k.

Une simple lecture au wattmètre donne la puissance cherchée en courant alternatif, si l'hypothèse d'un circuit sans self-induction était suffisamment approchée. En réalité, il y a une différence de

phase entre le courant dans la bobine à fil fin et la tension. On a, en effet, la formule générale :

$$V = ri + \frac{d\Phi}{dt}$$

et Φ, le flux qui traverse le circuit mobile n'est pas constant.

La puissance lue au wattmètre est supérieure à la puissance réelle; pour avoir cette dernière il faut multiplier la puissance indiquée par un facteur K, qui est < 1 et que l'on appelle le facteur de puissance du wattmètre. Ce facteur peut être calculé dans le cas particulier des courants sinusoïdaux.

Le wattmètre ne donne des résultats rigoureux que pour les courants continus ou sinusoïdaux.

71. Méthode du dynamomètre-différentiel. — Si les courbes des courants s'éloignent beaucoup de la forme sinusoïdale, la puissance n'est pas déterminée d'une façon certaine par le wattmètre ; le facteur de puissance est inconnu. — M. Potier a donné une méthode qui procède à la fois de celle du wattmètre et de celle des trois ampèremètres ou des trois voltmètres [1].

Imaginons un appareil analogue au wattmètre, mais différent de celui-ci par les points suivants : la bobine mobile *m* au lieu d'être à fil fin comprend plusieurs spires de gros fil ; au lieu d'une bobine fixe, il y en a deux identiques M et M' placées de part et d'autre de la bobine mobile ; l'appareil ainsi constitué s'appelle un *dynamomètre*. Le couple qui agit entre la bobine fixe M traversée par un courant I et la bobine mobile *m* traversée par un courant *i* serait $C = GIi$, G étant un coefficient qui dépend de la position relative des bobines M *m*.

Entre la seconde M' traversée par un courant I' et la bobine

(1) Cette intéressante mesure de la puissance nous a été communiquée par l'éminent membre de l'Institut, en octobre 1902 ; c'est avec son autorisation que nous la publions ici, nous lui en exprimons notre vive reconnaissance. R.S.



mobile m traversée par le courant i agit un couple analogue au précédent de moment $C' = G'I'i$, G' étant un coefficient dépendant de la position relative de M' et m.

Suivant le sens du courant dans M', ce couple agira pour faire tourner la bobine mobile, dans le même sens que le premier ou en sens inverse. On choisit le sens du courant dans M' de façon que les deux actions de M et M' se contrarient et on fixe la bobine M' à une position telle que la bobine mobile reste en équilibre lorsque les deux bobines fixes sont traversées par le même courant.

L'appareil ainsi disposé fonctionne en dynamomètre *différentiel*; dans ces conditions les deux coefficients G et G' sont égaux. Si deux courants différents I et I' parcourent M et M', la bobine mobile m parcourue par un courant i sera soumise à un couple résultant de moment.

$$C = G\,(I\,i - I'\,i).$$

Sous l'influence de ce couple, la bobine mobile tourne autour de son axe ; pour la ramener à sa position d'équilibre, il faut tordre le fil de suspension d'un angle α, tel que le couple de torsion soit égal au couple électro-dynamique exercé par les courants; or le couple de torsion est proportionnel à l'angle de torsion. On a donc :

$$C = A\alpha = G\,(I\,i - I'\,i).$$

d'où

$$I\,i - I\,i' = \frac{G\alpha}{A} = K\alpha$$

A et K étant des constantes, K sera connue par une expérience préliminaire avec des courants continus.

Cela posé, considérons un circuit ACB parcouru par un courant alternatif, pour lequel on veut connaître la puissance dégagée (fig. 26), jetons entre les bornes A et B de ce circuit une dérivation sans self ADB. Soient i le courant qui parcourt le circuit ACB, v la tension entre ses bornes AB, r' la résistance du circuit ADB,

i' le courant qui le parcourt, I le courant qui arrive à la bifurcation B. La puissance instantanée dégagée en ACD est $p = v\,i$

or $v = r'\,i'$

et $i' = \mathrm{I} - i$

donc $p = r'(\mathrm{I}-i)\,i = r'(\mathrm{I}\,i - i^2)$.

Fig. 26.

Si l'on fait traverser l'une des bobines M par I, l'autre fixe M' par i, et la bobine mobile m par i, si les courants sont constants, le couple électrodynamique résultant qui agira sur les équipages mobiles, sera équilibré par une torsion d'un angle α telle que

$$\mathrm{I}\,i - i^2 = \mathrm{K}\alpha$$

et par conséquent, la puissance dégagée sera

$$p = \mathrm{K}\,r'\alpha$$

Dans le cas de courants alternatifs, la puissance moyenne sera

$$\mathrm{P} = r\frac{1}{\mathrm{T}}\int_{\mathrm{T}}\left(\mathrm{I}\,i - i^2\right)dt$$

le couple électrodynamique moyen sera

$$\mathrm{C} = \mathrm{G}\frac{1}{\mathrm{T}}\int_{\mathrm{T}}\left(\mathrm{I}\,i - i^2\right)dt$$

Le couple étant rapidement variable, on pourra maintenir l'équipage mobile dans sa première position d'équilibre, en tordant le fil d'un angle α, tel que le couple de torsion égale le couple électrodynamique moyen

$$\mathrm{G}\,\frac{1}{\mathrm{T}}\int_{\mathrm{T}}\left(\mathrm{I}i - i^2\right)dt = \mathrm{A}\alpha$$

d'où

$$\frac{1}{\mathrm{T}}\int_{\mathrm{T}}\left(\mathrm{I}i - i^2\right)dt = \mathrm{K}\alpha$$

et par conséquent $\mathrm{P} = \mathrm{K}r\alpha$

le coefficient K est le même qu'en courant continu ; il est déterminé une fois pour toutes.

En définitive, pour appliquer cette méthode, on doit mesurer la résistance sans self que l'on a employée ; cela peut se faire avec précision en mesurant la tension efficace aux bornes de cette résistance et le courant efficace qui la parcourt à un moment quelconque, même lorsque l'appareil dont on veut connaître la puissance ne fonctionne pas. Connaissant cette résistance, une seule mesure avec le dynamomètre différentiel suffit pour connaître la puissance dégagée dans le circuit pour un voltage donné.

TROISIÈME PARTIE

ALTERNATEURS ET MOTEURS

CHAPITRE IX

GÉNÉRALITÉS SUR LES ALTERNATEURS

72. Induits et inducteurs. — Nous avons vu que, pour obtenir un courant alternatif, il suffit de produire des variations de flux de sens contraire dans un circuit (§ 46).

Pour produire ces variations alternatives de flux le plus aisément, on déplace l'un par rapport à l'autre un circuit et un champ magnétique.

L'ensemble formé par le circuit induit et son support s'appelle l'*induit*, l'appareil qui crée le champ inducteur, l'*inducteur*.

On obtient ainsi une première grande classe d'alternateurs, les alternateurs à déplacement relatif de l'induit et de l'inducteur.

La classification de ces alternateurs peut se faire d'une façon rationnelle par la considération de la forme de l'induit.

L'induit est dit à anneau, à cylindre ou à disque, suivant que son circuit engendre un anneau, un cylindre ou un disque.

73. Induit à anneau. — L'induit à anneau se compose d'un tronçon de tube de fer doux appelé *armature*, sur lequel on enroule le fil de l'induit, en le passant successivement sur une génératrice extérieure et sur une génératrice intérieure (fig. 27).

Fig. 27.

Soit un induit à anneau tournant entre deux pôles magnétiques de nom contraire N et S.

L'étude du flux montre que les lignes de force traversent l'espace d'air ou *entrefer* compris entre l'armature et les pôles, du pôle nord vers le pôle sud et ne dépendent pas de la vitesse de rotation de l'induit. Dans la cavité intérieure du tube de fer, le champ est négligeable devant le champ dans l'entrefer.

Le plan perpendiculaire à la direction moyenne des lignes de force et passant par l'axe de l'induit est un plan de symétrie de la machine, on l'appelle le plan de la ligne neutre ou simplement *la ligne neutre*.

Lorsque l'induit tourne, les spires coupent les lignes de force qui entrent dans l'armature à gauche de la ligne neutre, et les lignes de force qui en sortent à droite de la ligne neutre ; de part et d'autre de la ligne neutre, les forces électromotrices induites dans chaque spire sont donc inverses, § 32. Si les spires de gauche sont le siège de forces électromotrices faisant circuler un courant dans le sens centrifuge pour la portion de spire vue sur la figure et d'avant en arrière sur la génératrice qui passe dans l'entrefer, les spires de droite seront le siège de forces électromotrices faisant naître un courant centripète dans la portion de spire vue sur la figure, § 31 et 32 ; si les premières sont positives, les secondes seront négatives.

Supposons que la bobine couvre une moitié de l'anneau (fig. 28); les deux extrémités *ab* seront sur un même diamètre de l'induit. Lorsque *ab* passe sur la ligne neutre *nn'*, toutes les spires sont par exemple le siège de forces électromotrices positives. Si l'anneau tourne, le diamètre *ab* s'incline et vient en *mm'*; les spires comprises sur la partie *npn'* engendrent des forces électromotrices positives et celles comprises sur la partie *n p' n'*, des forces électromotrices négatives : la force électromotrice totale a diminué. Quand *ab* coïncide avec la ligne *pp'* les forces électromotrices positives sont exactement compensées par les forces électromotrices négatives; la force électromotrice totale est nulle. Si l'anneau continue de tourner, les forces électromotrices négatives deviennent prépondérantes : la force électromotrice totale est alors négative ; quand *ab* est venu en *n'n* toutes les forces électromotrices sont négatives; la force électromotrice totale négative est maximum en valeur absolue et ainsi de suite, de sorte que la force électromotrice totale induite dans l'anneau est représentée par une des courbes de la figure 20 ; elle est maxima quand le diamètre *ab* est sur la ligne neutre et elle est nulle quand ce diamètre est sur la perpendiculaire *pp'* à cette ligne.

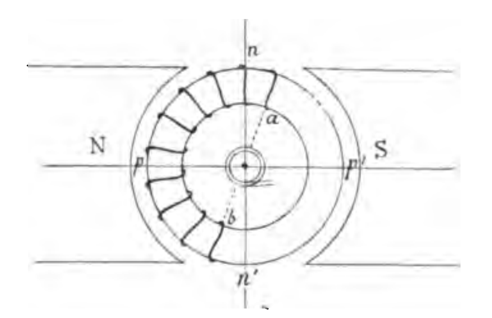


Fig. 28.

La force électromotrice engendrée par le mouvement de l'induit dans le champ des inducteurs est positive aussi longtemps que l'extrémité antérieure *a* de la bobine se trouve au-dessus du diamètre *pp'*, négative quand elle est au-dessous.

Si les extrémités de cette bobine sont réunies par un circuit

extérieur, ce circuit est parcouru par un courant alternatif [1].

On le recueille pratiquement de la façon suivante : deux bagues métalliques isolées, étant fixées et tournées sur l'axe de rotation de l'induit (fig. 29), sont réunies métalliquement et respectivement aux deux extrémités d'une bobine de l'induit ; on fait appuyer sur elles deux frotteurs que l'on réunit aux bornes du circuit extérieur. Elles sont représentées (fig. 28) avec des diamètres différents.

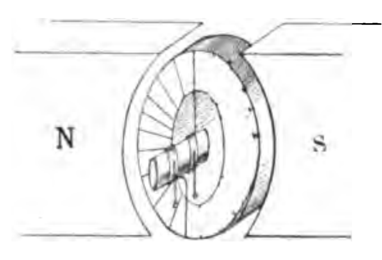


Fig. 29.

On multiplie l'effet obtenu en disposant régulièrement autour d'une armature de grandes dimensions un nombre pair de pôles alternativement de noms contraires.

On a disposé régulièrement sur l'armature un nombre de bobines identiques entre elles, égal au nombre de pôles. De cette façon, si une bobine est le siège d'une force électromotrice donnée, toutes les bobines qui occupent la même position relative par rapport aux pôles, sont le siège de forces électromotrices égales, les unes positives, les autres négatives, suivant que le flux coupé entre dans l'armature ou en sort.

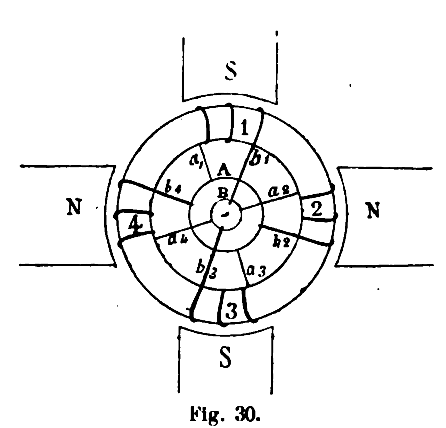


Fig. 30.

Supposons par exemple que l'on ait 4 pôles et 4 bobines (fig. 30). Si l'on réunit à la même bague A les extrémités a_1, b_2, a_3, b_4 des bobines 1, 2, 3, 4 par lesquelles le courant sort

[1] Voir plus loin § 128 un cas particulier traité plus complètement.

à un instant donné, c'est-à-dire les pôles positifs à cet instant, et à la même bague B les extrémités b_1, a_2, b_3, a_4 par où le courant entre dans ces bobines au même instant, c'est-à-dire les pôles négatifs, on a ainsi groupé les bobines en quantité. En réunissant les bagues par un circuit extérieur, ce circuit est parcouru par un courant égal à la somme des courants engendrés par chacune des bobines séparément.

Au lieu de réunir les bobines induites par leurs extrémités de même polarité, on peut les réunir de façon que le courant de l'une traverse la suivante dans le même sens ; on réunit pour cela le pôle positif de l'une au pôle négatif de la suivante, et ainsi de suite. Si l'on joint l'extrémité positive libre de la dernière bobine à l'une des bagues et l'extrémité libre négative de la dernière à l'autre bague, le circuit extérieur est traversé par un courant et la force électromotrice du générateur est égale à la somme des forces électromotrices de chaque bobine.

On peut, si l'on veut, grouper un certain nombre de bobines en quantité, et associer ensuite en série les groupes ainsi formés ; on a alors un groupement mixte. Il est facile en général d'associer les bobines suivant l'effet que l'on veut produire.

Nous avons supposé l'induit mobile et placé à l'intérieur de la couronne de pôles inducteurs. L'anneau peut être extérieur et fixe, la couronne de pôles, intérieure et mobile; ou encore l'anneau peut être aplati dans le sens de son axe et mobile entre deux couronnes de pôles de noms contraires en regard.

La fréquence du courant est égale au nombre de tours par seconde si l'induit tourne entre deux pôles ; elle est égale à 2, 3... fois le nombre de tours par seconde si l'induit tourne entre 2, 3..... paires de pôles.

74. Induit à tambour. — L'induit à anneau a reçu une

amélioration heureuse. Remarquons en effet que lorsque l'anneau est intérieur au champ inducteur, les génératrices extérieures de l'induit coupent seules les lignes de force ; le fil qui passe sur les génératrices intérieures reste inactif, car le champ est négligeable (§ 73) ; ce fil est inutile et même nuisible, car, étant traversé par le courant, il dégage notamment de la chaleur perdue. L'inverse a lieu si l'anneau est extérieur et l'inducteur intérieur ; le fil extérieur est inutile. Pour supprimer cet inconvénient, le fil induit est fixé uniquement sur les génératrices de la surface de l'anneau, tournées vers les pôles inducteurs, c'est-à-dire sur la surface extérieure de l'armature si les inducteurs sont fixes et l'induit intérieur mobile ; sur la surface intérieure, si l'induit est extérieur et fixe et les inducteurs mobiles.

Cet induit porte le nom d'induit à tambour ou à cylindre. Cette forme d'induit est de beaucoup la plus répandue. Les grands alternateurs de l'Exposition de 1900 appartiennent presque tous à ce type à induit fixe ; les fils induits sont placés dans des rainures parallèles aux génératrices de la surface cylindrique intérieure de l'armature ; les inducteurs sont des pôles d'électro-aimants fixés sur un volant de plusieurs mètres de diamètre mû directement par un moteur à vapeur ou une turbine.

75. Induit à disque. — Dans certains alternateurs on supprime tout fer dans l'armature, l'induit est formé de bobines plates tournant dans leur plan autour d'un axe.

Les champs magnétiques inducteurs sont développés par des pôles magnétiques de noms contraires, placés en regard l'un de l'autre, entre lesquels passe l'induit. Ces pôles magnétiques sont placés par paires suivant une double couronne de façon que les champs produits soient alternativement positifs et négatifs ; l'axe de la couronne est l'axe de rotation de l'induit.

L'induit engendre un disque par sa rotation : c'est l'induit à disque ; la machine Siemens, l'un des premiers alternateurs industriels, appartient à ce type; les grands alternateurs Ferranti en sont un perfectionnement.

76. Alternateurs à fer tournant. — Pour faire naître un courant induit dans un circuit, il n'est pas nécessaire que l'induit coupe les lignes de force du champ, il suffit, d'après une autre loi de l'induction, de faire varier le flux qui traverse les spires du circuit.

Imaginons un électro-aimant fixe et une barre de fer doux appelée armature, mobile devant ses pôles ; enroulons sur l'une des branches B de l'électro, une bobine de fil inducteur parcourue par un courant constant et sur l'autre branche *b*, une bobine de fil induit (fig. 31) ; les lignes de force magnétique, développées par le courant constant, se ferment dans le circuit magnétique formé par le noyau de l'électro-aimant et l'armature.

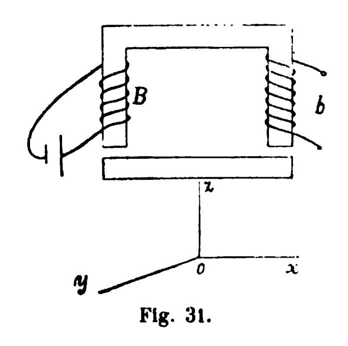


Fig. 31.

Si l'armature est bien en face des noyaux inducteurs et laisse le plus petit entrefer possible, la résistance magnétique du circuit est minimum ; si l'armature se déplace en faisant croître l'entrefer, la résistance du circuit magnétique augmente et le flux diminue (§ 45). En faisant tourner l'armature, on fait varier d'une manière périodique l'entrefer, et, par suite, la résistance magnétique et le flux ; la bobine induite devient alors le siège d'un courant alternatif.

Ce qui distingue ces alternateurs des précédents, c'est que ni l'inducteur ni l'induit ne sont mobiles; le bobinage de l'induit et

celui de l'inducteur sont plus faciles, plus sûrs et plus durables, n'étant pas soumis à la force centrifuge.

Les bobines inductrices sont connectées à la source du courant continu et l'induit au circuit extérieur par de simples bornes sans bagues à frotteurs.

L'armature peut tourner en décrivant un cylindre autour de l'axe *ox*, un disque autour de l'axe *oy* qui le traverse, ou un anneau autour de l'axe *oz* qui est perpendiculaire aux deux axes précédents ; d'où trois types d'alternateurs à fer tournant.

77. Inducteurs. — Les pôles inducteurs sont des aimants permanents ou des électro-aimants.

Dans l'immense majorité des cas, les inducteurs sont des électro-aimants *excités* par une petite source auxiliaire de courant continu ; en général, c'est une petite dynamo mue par le moteur qui commande l'alternateur (§ 138, Pl. I) ; ou bien le courant inducteur est obtenu par transformation directe ou indirecte du courant alternatif en courant continu, par l'intermédiaire des commutatrices qui doivent être étudiées plus loin, chapitres XVI et XVII.

Dans quelques cas particuliers, les inducteurs sont des aimants permanents : c'est lorsque l'on veut supprimer la complication d'une source auxiliaire de courant continu, dans de petites machines ; ou lorsqu'on veut produire un travail toujours le même avec la plus grande sécurité possible à l'abri de tous les à-coups, même de ceux qui peuvent provenir d'une dynamo auxiliaire.

L'éclairage des phares est assuré depuis longtemps par les alternateurs de Méritens à aimants permanents ; ces machines sont beaucoup plus coûteuses que les premières ; sous un poids égal les aimants permanents produisent un champ beaucoup moins intense que les électro-aimants ; en outre, lorsque la demande de

puissance est variable, les machines à aimants permanents sont très inférieures aux premières.

Aussi les alternateurs industriels sont-ils tous à électro-aimants inducteurs.

CHAPITRE X

FORCE ÉLECTROMOTRICE DES ALTERNATEURS CARACTÉRISTIQUES

78. Force électromotrice. — La force électromotrice totale créée dans l'induit d'un alternateur peut être décomposée en deux forces électromotrices partielles.

Soit Φ le flux total qui traverse l'induit de l'alternateur, la force électromotrice totale est $e = -\frac{d\Phi}{dt}$.

Le flux total Φ peut être considéré comme la somme de deux flux : l'un, Φ_e, dû au champ des inducteurs, le courant étant nul dans l'induit ; l'autre, Φ_p, créé par le courant dans l'induit, le champ des inducteurs étant nul.

$$\Phi = \Phi_e + \Phi_p$$

il en résulte

$$(1) \qquad e = -\frac{d\Phi_e}{dt} - \frac{d\Phi_p}{dt}$$

On appelle *force électromotrice génératrice, la force électromotrice induite par les inducteurs seuls*, parce qu'elle est la cause de toutes les autres. On la désigne par E.

La force électromotrice $-\frac{d\Phi_p}{dt}$ est la force électromotrice de self-induction.

La force électromotrice totale d'un alternateur est donc égale à

la somme de la force électromotrice génératrice et de la force électromotrice de self-induction

79. Puissance. — La puissance mécanique absorbée par un alternateur et transformée en puissance électrique est (§ 65)

$$P = \frac{1}{T} \int_T eidt$$

e étant la force électromotrice totale de l'alternateur : si on pose $e = E - \frac{d\Phi_p}{dt}$

$$P = \frac{1}{T} \int_T Eidt - \frac{1}{T} \int_T \frac{d\Phi_p}{dt} idt$$

Or, la puissance moyenne absorbée relative à la force électromotrice de self-induction est nulle (§ 65). *La puissance mécanique moyenne absorbée par un alternateur est donc égale à la puissance électrique moyenne absorbée par sa force électromotrice génératrice*, nous l'appellerons simplement la puissance de l'alternateur. Elle dépend du courant, de la force électromotrice et du décalage.

Remarquons que l'induit et l'inducteur d'un alternateur ne peuvent supporter qu'un courant déterminé sans échauffement dangereux pour la machine ; que la force électromotrice a une valeur déterminée qui, pour une vitesse donnée, dépend uniquement du champ et par suite du courant des inducteurs. La puissance apparente d'un alternateur donné ne peut par conséquent dépasser une valeur déterminée. La puissance réelle sera en général plus petite que cette dernière à cause du décalage de la force électromotrice et du courant. Ce décalage dépendant surtout des appareils branchés sur le circuit de l'alternateur, il sera important d'en faire un choix judicieux pour rendre le décalage aussi voisin de zéro que possible et rendre par suite la puissance de l'alternateur aussi grande que possible.

80. Forces électromotrices moyenne et efficace. — La force électromotrice moyenne de l'alternateur est nulle, si on la rapporte à une période entière ; elle a une valeur bien déterminée si on la rapporte à une demi-période où elle garde un signe constant, elle est alors définie par l'égalité

$$Em = \frac{1}{\frac{T}{2}} \int_{\frac{T}{2}} E dt.$$

On a une valeur approchée de cette grandeur en divisant le flux maximum qui traverse le circuit de l'induit par un quart de période.

Si S est la surface embrassée par les spires de l'induit, n le nombre de spires, B l'induction maximum et f la fréquence

$$Em \text{ approchée} = 4 n f S B$$

On ne mesure pas la force électromotrice moyenne, mais la force électromotrice efficace, on a en général :

$$V = e - ri$$

r et i représentant la résistance et le courant de l'induit, e la force électromotrice totale induite, V la tension aux bornes du extérieur. Pour les alternateurs, e étant donné (1) (§ 78)

$$V = E - \frac{d\Phi_p}{dt} - ri$$

or, le flux Φ_p est constamment nul ou sensiblement nul dans le cas où le circuit extérieur est ouvert, ou fermé sur une résistance extérieure très grande ; car le courant est toujours nul ou sensiblement nul ; ri et $\frac{d\Phi_p}{dt}$ sont donc nuls avec i et

$$V_e^2 = \frac{1}{T} \int_T E^2 dt$$

Pour une vitesse de rotation donnée, la force électromotrice efficace de la machine est donc égale à sa tension efficace aux bornes du circuit extérieur ouvert. On la mesure par un voltmètre.

81. Caractéristique à vide. — La force électromotrice d'un alternateur à électro-aimant inducteur peut varier dans de très larges limites quand on fait varier l'*excitation* des inducteurs.

Sur deux axes de coordonnées, on porte en abscisse le courant dans les inducteurs et en ordonnée la force électromotrice induite par le seul champ inducteur ; à une abscisse O P proportionnelle à une intensité *i* dans l'inducteur, correspond une ordonnée M P proportionnelle à la force électromotrice efficace induite dans l'induit pour cette intensité du courant inducteur (fig. 32). Le point M, dont l'abscisse et l'ordonnée sont O P et M P, est le point représentatif de la force électromotrice efficace ; en faisant varier l'excitation, le point M varie et décrit une courbe appelée *Caractéristique à vide* de l'alternateur : elle a la forme remarquable ci-contre (fig. 32).

Fig. 32.

Pour les faibles excitations elle est rectiligne ; lorsque l'excitation est suffisamment forte, la courbe est de nouveau sensiblement rectiligne mais plus inclinée sur l'axe des abscisses ; de sorte que l'aspect de la caractéristique à vide est celle de deux lignes sensiblement droites raccordées dans la partie moyenne par une courbe appelée *coude* de la caractéristique.

Dans la première partie de la courbe, la force électromotrice croît plus rapidement avec l'excitation que dans la dernière ; cela tient à ce que pour de faibles excitations la perméabilité du fer est plus grande que pour de fortes.

Le courant inducteur subit des variations dues aux inévitables

variations de vitesse du moteur qui commande la dynamo ; il est aisé de voir que ces fluctuations du courant influeront beaucoup moins sur la force électromotrice dans le deuxième cas que dans le premier ; par suite la machine fournit un courant plus stable, c'est-à-dire d'intensité efficace plus constante dans un circuit donné, lorsque les inducteurs sont fortement excités.

82. Réaction d'induit. — Lorsque, pour une même excitation des inducteurs, la machine débite un courant dans un circuit extérieur, la tension aux bornes diminue d'autant plus que le couraut est plus intense. Cette baisse de tension s'appelle la *réaction d'induit*.

83. Caractéristique en charge. — Si le circuit extérieur sert uniquement à l'éclairage par incandescence, la machine travaille sur une résistance sans self ; la puissance qu'elle fournit est égale au produit de la tension efficace par l'intensité efficace ; on est donc conduit à tracer la courbe de la tension efficace aux bornes en fonction de l'intensité efficace dans le circuit extérieur sans self-induction ; cette courbe s'appelle la caractéristique extérieure de la machine sur résistances non inductives.

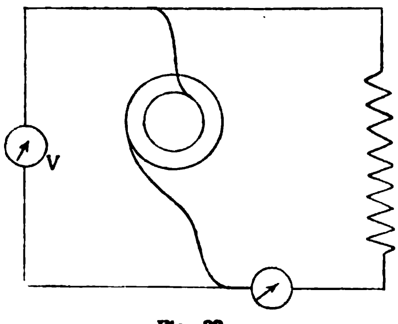


Fig. 33.

On fait varier l'intensité dans le circuit en faisant varier la résistance extérieure (fig. 33). Un ampèremètre placé dans le circuit extérieur et un voltmètre en dérivation aux bornes de l'alternateur suffisent pour permettre de tracer la caractéristique en charge. Si l'on porte en abscisses les débits en ampères, et en ordonnées les voltages correspondants,

on obtient, pour une excitation et une vitesse données de l'alternateur, une courbe qui s'incline vers l'axe des intensités d'autant plus que le débit est plus grand (fig. 34).

Supposons qu'un volt et un ampère soient représentés l'un et l'autre par une longueur d'un millimètre :

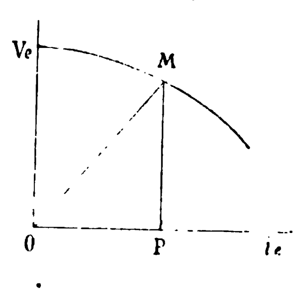


Fig. 34.

1° Le rectangle dont les côtés sont le débit et le voltage a une surface dont la valeur en millimètres carrés, est la valeur numérique de la puissance en watts.

Ainsi un alternateur qui débite 100 ampères sous 110 volts efficaces produit une puissance utile de 11000 watts ou 11 kilowatts.

2° La résistance extérieure r qui est donnée par la formule : $r = \frac{V_e}{i_e}$ est représentée sur la courbe par le coefficient angulaire de la droite O M qui joint le point M de la courbe à l'origine des coordonnées.

Si donc l'on connaît d'avance le nombre et la nature des lampes à incandescence distribuées sur le réseau, par suite la résistance extérieure, on peut déduire de la caractéristique le voltage aux bornes de l'alternateur et le débit.

3° A chaque excitation correspond une caractéristique extérieure différente ; les caractéristiques qui sont relatives aux excitations les plus élevées enveloppent celles qui correspondent aux excitations les plus petites ; par suite, pour un courant donné dans le circuit extérieur, on augmente le voltage aux bornes en augmentant l'excitation de l'alternateur.

84. Caractéristique sur circuits inductifs. — La caractéristique extérieure de l'alternateur sur résistances induc-

tives ne se confond pas avec la précédente. Pour un même accroissement de courant la chute de tension est plus grande, on obtient par suite un courant plus petit dans le circuit extérieur.

La puissance réelle n'est plus égale à la puissance apparente, mais inférieure (§ 64); les conditions de fonctionnement deviennent plus compliquées. Pour une même résistance, l'alternateur fournit un courant différent d'une self-induction à une autre.

De même que l'on considère la caractéristique de l'alternateur travaillant sur des résistances sans self-induction, on considère la caractéristique de l'alternateur débitant sur un circuit inductif sans résistance, c'est pratiquement le cas des bobines en fil de cuivre enroulées sur un noyau de fer doux.

La caractéristique sur résistances non inductives ne peut en général se déterminer qu'après la mise en service de l'alternateur; lorsque la puissance est considérable, l'essai de l'alternateur n'est donc pas possible à ce point de vue, avec un moteur de puissance notablement plus faible que celle de l'alternateur; il n'en est pas de même de la caractéristique à vide et de la caractéristique sur circuit inductif. La théorie permet d'ailleurs de les déterminer, avant même que la machine soit construite; de la connaissance de ces caractéristiques, on peut déduire la valeur de la tension pour chaque courant dans un circuit extérieur quelconque.

CHAPITRE XI

DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE. — RÉGULATION DES ALTERNATEURS

85. Modes de distribution de l'énergie. — Supposons, pour fixer les idées, qu'il s'agisse d'éclairage par lampes à incandescence ; le raisonnement serait analogue s'il s'agissait de lampes à arc ou de moteurs.

Une lampe à incandescence éclaire normalement lorsqu'un courant déterminé la traverse, un courant plus fort peut la détériorer et la brûler, un courant plus faible produit un mauvais éclairage. Pour le fonctionnement normal de la lampe, l'alternateur devra donc lui fournir un *courant efficace constant.*

D'autre part le passage du courant dans un circuit crée une tension entre ses bornes; à un courant normal donné dans la lampe correspond une tension efficace déterminée entre ses bornes et on peut dire que, pour le fonctionnement normal de la lampe, l'alternateur devra entretenir une *tension efficace constante* entre les bornes des récepteurs.

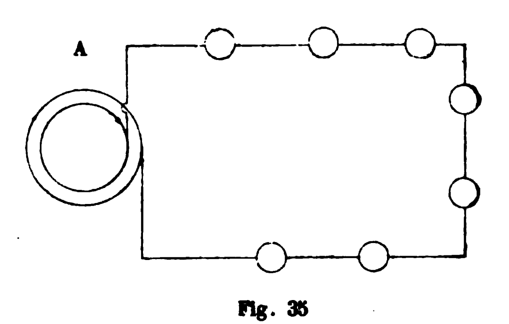


Fig. 35

De là deux modes principaux de distribution de l'énergie.

Soit A un alternateur.

1° On peut relier ses bornes par un circuit unique, sans dérivations, comprenant tous les récepteurs de façon que le même courant traverse chacun d'eux (fig. 35); c'est la distribution dite en *série* ou en *tension.*

2° On peut relier ses bornes à deux conducteurs et brancher, en dérivation sur ces derniers, tous les récepteurs (fig. 36); c'est la distribution en *dérivation* ou en *quantité*.

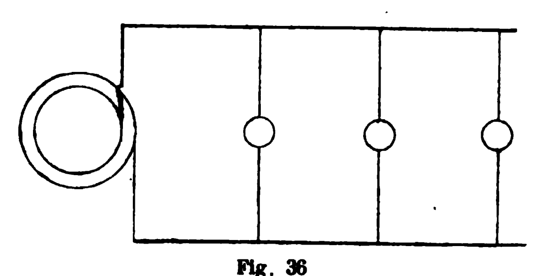


Fig. 36

Les conducteurs sont supportés par des isolateurs en porcelaine comme ceux qui supportent les fils télégraphiques.

86. Distribution en série. — Lorsque les lampes fonctionnent, un même courant les traverse toutes ; on ne peut supprimer le courant dans l'une, sans le supprimer en même temps dans toutes les autres (§ 2).

Une lampe peut cesser de fonctionner par la rupture de son filament de charbon; par cela même le courant serait supprimé dans toutes les autres. Pour éviter cet inconvénient, on place aux bornes de la lampe une petite bobine de self-induction; quand la lampe fonctionne, cette dernière est traversée par un courant watté très faible par rapport au courant watté de la lampe; lorsque le circuit de la lampe est interrompu, la bobine de self-induction qui reste branchée continue à laisser passer le courant total, sans provoquer de trop grandes variations de tension aux bornes des autres récepteurs.

On a ainsi assuré la sécurité et la stabilité du fonctionnement de la distribution en série par un dispositif qui ne demande qu'une très faible dépense d'énergie supplémentaire (§ 64 et 65).

La tension efficace aux bornes de chaque lampe devant être sensiblement constante, la tension aux bornes de l'alternateur est

proportionnelle au nombre des lampes, si elles sont identiques ; elle est considérable si ce nombre est élevé.

L'élévation de la tension est très avantageuse pour un transport économique de l'énergie à distance (§ 122), mais constitue un danger de mort pour toute personne qui viendrait à toucher la ligne, si un seul point de cette dernière communique métalliquement avec la terre. Dans ce dernier cas, en effet, entre la terre et un autre point de la ligne, il existe une tension variable avec le nombre et la nature des récepteurs compris entre le point considéré et celui qui est relié à la terre. Si cette tension dépasse 200 volts environ, toute personne qui touche le point considéré sans s'être isolé du sol (en se plaçant sur un bloc isolant § 3) est foudroyée.

La distribution en série ne peut être employée pour l'éclairage des appartements ; mais elle peut l'être dans l'éclairage public, quand les lampes ne sont pas à la portée de la main.

Elle peut être employée sans inconvénient pour les moteurs, à condition que ces derniers soient isolés du sol ainsi que les appareils de mise en marche et de réglage, qui sont d'ailleurs montés sur plancher isolant.

Ce mode de distribution est rarement employé en France et même en Europe, du moins en courant alternatif.

87. Distribution en dérivation. — Ce mode de distribution se prête fort bien à l'éclairage privé. On peut choisir, comme tension entre les bornes de l'alternateur et par suite entre les lignes de la distribution, une tension qui ne soit pas dangereuse, 110 volts par exemple.

L'introduction ou la suppression du courant dans une lampe ne modifiera pas sensiblement le courant dans les autres et la mise à la terre d'un point du circuit ne pourra provoquer entre le



sol et un autre point qu'une tension efficace au plus égale à 110 volts, tension qui n'offre aucun danger.

Avec un circuit simple comme celui de la fig. 36, la tension aux bornes d'une lampe est, à cause de la chute ohmique de la tension dans les conducteurs, d'autant plus faible que cette lampe est plus éloignée de l'usine. Comme les lampes doivent

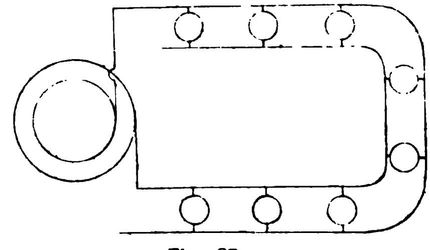


Fig. 37

fonctionner à un voltage bien déterminé, et afin de réduire les variations de tension aux bornes des diverses lampes, on emploie souvent la distribution en *boucle* ou en *ceinture* (fig. 37).

Dans le même but et pour accroître le rayon de distribution, on emploie des *feeders* ou *conducteurs d'alimentation* qui aboutissent à divers points de la distribution convenablement choisis et qu'on

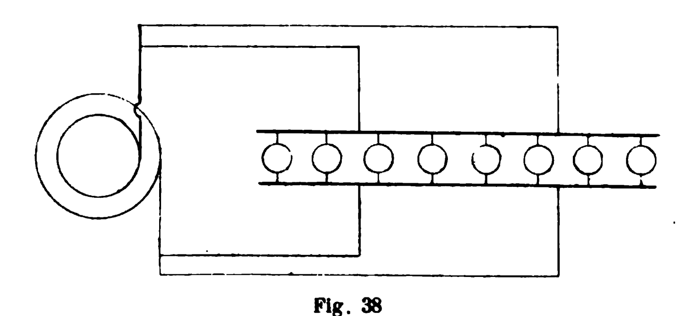


Fig. 38

appelle *centres de distribution* (fig. 38). Les feeders sont calculés de façon que le passage du courant produise dans chacun d'eux, de l'usine à chaque centre de distribution, la même chute de tension.

La distribution en dérivation est d'un emploi aussi commode et aussi général pour les moteurs que pour les lampes.

88. Régulation de l'alternateur. — Dans la distribution en série, l'alternateur devra fournir une force électromotrice capable de faire passer dans tous les récepteurs un courant efficace constant ; c'est pour cela qu'on appelle quelquefois cette distribution, distribution à *courant constant.*

Pour réaliser cette condition, on placera un ampèremètre sur le circuit et on agira sur l'excitation de l'alternateur de façon à ramener l'indication de l'ampèremètre à sa valeur normale.

Dans la distribution en dérivation, le courant variera avec le nombre de récepteurs en service, la tension efficace variera entre les lignes de la distribution par suite de la réaction d'induit. L'alternateur devra fournir une force électromotrice capable de maintenir cette tension sensiblement invariable; c'est pour cela qu'on appelle quelquefois cette distribution, distribution à *tension constante.*

On atteindra pratiquement ce résultat en branchant un voltmètre entre les deux lignes de distribution et en modifiant l'excitation de l'alternateur de façon à ramener l'indication du voltmètre à sa valeur normale.

On peut changer cette excitation en intercalant un rhéostat, c'est-à-dire une résistance variable dans le circuit extérieur de la dynamo auxiliaire, ou dans le circuit de l'excitation de cette dynamo, ou dans les deux simultanément.

La régulation se fait en modifiant les résistances du rhéostat d'excitation, à la main ou automatiquement.

Supposons en effet que le courant extérieur traverse une bobine dans laquelle pénètre un noyau de fer doux contrebalancé par un contre-poids ; suivant que le courant est plus ou moins intense, le noyau de fer doux pénètre plus ou moins dans la bobine ; ce déplacement du noyau de fer doux peut être utilisé à déplacer la manette d'un rhéostat ou à faire varier une résistance par tout autre moyen.

Remarquons que lorsque la charge de l'alternateur augmente, un surcroît de puissance est demandé au moteur qui le conduit ; la vitesse de ce dernier baisse ; la chute de tension de l'alternateur a pour conséquence le ralentissement de son moteur et inversement. M. Routin maintient la tension et la vitesse du moteur constantes par un même appareil, en faisant agir le courant extérieur sur un électro-aimant qui commande simultanément le rhéostat d'excitation et l'admission de la vapeur.

89. Idée du compoundage des alternateurs. — Nous avons vu, dans le cas de l'éclairage, que la régulation du voltage peut se faire par le changement de l'excitation dans l'alternateur, par la manœuvre à la main ou automatique d'un rhéostat ; ce procédé s'applique aussi au cas du circuit inductif.

Lorsque l'alternateur alimente des moteurs, il peut arriver, si les résistances varient brusquement sur leurs arbres, que la demande de courant augmente brusquement d'une façon notable sans que la manœuvre à la main ou la manœuvre automatique ait eu le temps de donner à l'excitation la valeur convenable pour maintenir la tension constante aux bornes malgré l'augmentation du débit ; si l'alternateur sert en même temps à l'éclairage, on observe dans l'intensité lumineuse des fluctuations énormes qui proscrivent absolument l'emploi de l'alternateur simultanément pour l'éclairage et les applications mécaniques.

Même dans le cas où l'alternateur doit servir uniquement aux moteurs, la baisse de tension est très préjudiciable, car la puissance transmise est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à la tension.

On a donc eu l'idée d'adopter pour les alternateurs un circuit excitateur des inducteurs tel que, par le fait même que le courant devient plus grand et que la self-induction varie dans le

circuit extérieur, le courant inducteur change dans des proportions calculées telles que la tension reste constante aux bornes de l'alternateur.

Lorsque le circuit excitateur d'un alternateur est ainsi calculé, on dit que l'alternateur est *compoundé*. La théorie en est trop complexe pour être abordée ici.

CHAPITRE XII

COURANTS POLYPHASÉS

90. Courants polyphasés.— Supposons une suite de pôles magnétiques disposés suivant une même couronne circulaire et également espacés les uns des autres, les pôles nord étant alternés avec les pôles sud, tous ces pôles ayant d'ailleurs la même intensité magnétique, c'est-à-dire donnant naissance au même flux magnétique.

Fig. 39.

Supposons la couronne rectifiée (fig. 39) et considérons une bobine A se déplaçant parallèlement à la ligne de ces pôles avec une vitesse constante. Le courant développé dans la bobine est un courant alternatif périodique : la période T est le temps qui s'écoule entre les passages du milieu de la bobine devant les axes de deux pôles nord consécutifs.

Soit d la distance de deux pôles consécutifs de même nom (fig. 39). Au lieu d'une seule bobine, considérons-en trois mainte-

nant, dont les centres sont distants de $\frac{d}{3}$; ces trois bobines étant d'ailleurs identiques et isolées les unes des autres.

Soient e_1, e_2, e_3 les forces électromotrices instantanées développées, et i_1, i_2, i_3, les intensités des courants produits à un même moment dans les trois bobines A_1, A_2, A_3 ; au bout du temps $\frac{T}{3}$, la bobine A_1 a remplacé la bobine A_2 et celle-ci a remplacé la bobine A_3, tandis que la bobine A_3 est venue dans la position A_1' distante de d de la position initiale de A_1.

Les intensités des courants au bout du temps $\frac{T}{3}$ sont i_2 pour la bobine A_1, i_3 pour la bobine A_2 et i_1 pour la bobine A_3.

Il est facile de voir, de même, qu'au bout du temps $\frac{2T}{3}$, les intensités des courants sont respectivement dans les bobines A_1, A_2, A_3 : i_3, i_1, i_2 ; puis au bout du temps $\frac{3T}{3}$ ou T elles sont revenues à leurs valeurs initiales i_1, i_2, i_3, et ainsi de suite pour les périodes suivantes.

D'une manière générale, on obtient les valeurs des intensités des courants dans les trois bobines au bout de temps distants de $\frac{T}{3}$ par permutation tournante entre les indices 1, 2, 3.

Si l'on connaît la courbe du courant pour l'une des bobines A_1 par exemple, si i est le courant qui la traverse à l'instant t, le courant qui traverse la deuxième bobine A_2 au même instant est celui qui traversera la première à l'instant $t + \frac{T}{3}$: il est décalé en avance de $\frac{T}{3}$ par rapport au courant de la première.

Le courant qui traverse la troisième A_3 au même instant est le courant qui traversera la première à l'instant $t + \frac{2T}{3}$ décalé en avance de $\frac{2T}{3}$ par rapport au courant de la première c'est-à dire en avance de $\frac{T}{3}$ par rapport au courant de la seconde. Ces trois courants décalés l'un par rapport à l'autre d'un tiers de période sont appelés courants *triphasés*.

La figure 40 représente les diagrammes de leurs intensités en fonction du temps.

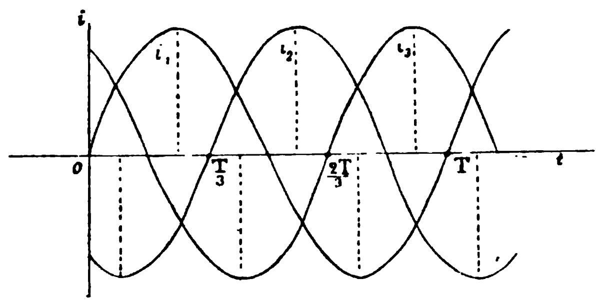


Fig. 40.

Au lieu de courants triphasés, il est facile d'obtenir semblablement des courants *tétraphasés* en employant quatre bobines au lieu de trois (on les appelle souvent mais improprement courants *diphasés*).

En général, on peut obtenir des courants décalés l'un par rapport à l'autre de $\frac{1}{n}$ de période en employant n bobines ; ces courants sont dits *polyphasés* d'ordre n.

91. Transmission des courants polyphasés. — Revenons aux courants triphasés; au lieu de supposer les bobines génératrices isolées les unes des autres, on les réunit l'une à l'autre par les deux extrémités voisines ; les forces électromotrices engendrées dans chacune d'elles restent toujours décalées de $\frac{1}{3}$ de période l'une par rapport à l'autre.

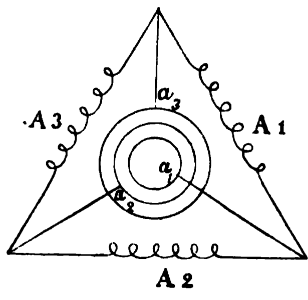


Fig. 41.

Si l'on joint les extrémités communes de A_1 et A_2 à une bague a_1, (fig. 41) les extrémités communes de A_2 et A_3 à une bague a_2, les extrémités communes de A_3 et A_1 à une bague a_3, ces trois bagues étant isolées de l'axe de rotation, en faisant appuyer sur elles trois

frotteurs f_1, f_2, f_3, on a entre les frotteurs f_1 et f_2 une tension :

$$V_1 = ri_1 - e_1,$$

entre les frotteurs f_2 et f_3 une tension :

$$V_2 = ri_2 - e_2$$

et entre les frotteurs f_3 et f_1 une tension :

$$V_3 = ri_3 - e_3.$$

Or au bout du temps $\frac{T}{3}$, les courants et les forces électromotrices subissent les changements suivants :

i_1	devient	i_2	e_1	devient	e_2
i_2	—	i_3	e_2	—	e_3
i_3	—	i_1	e_3	—	e_1

Les tensions entre les bornes des frotteurs sont donc triphasées comme les forces électromotrices et les courants induits.

Réunissons ces frotteurs, par trois fils conducteurs égaux, aux trois points de division d'un circuit récepteur fermé divisé en trois sections égales, analogue au précédent.

Les tensions aux bornes des frotteurs se permutant tous les tiers de période, il est évident, puisque les trois circuits partiels sont identiques, que les courants qui parcourent chacun d'eux se permutent également tous les tiers de période.

Le système des trois circuits partiels est parcouru par des courants triphasés.

On voit donc qu'il suffit de trois fils pour transmettre des courants triphasés, d'une station génératrice où ils sont produits dans trois circuits, à une station réceptrice où on les recueille dans trois circuits partiels ayant deux à deux une extrémité commune et formant un circuit fermé.

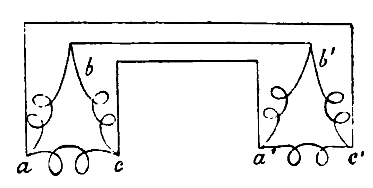


Fig. 42.

Ce système de distribution s'appelle distribution *en triangle*. Il est schématisé par la figure 42.

Au lieu de réunir deux à deux et à une bague, les extrémités voisines de deux bobines génératrices ou de deux bobines réceptrices, on peut réunir entre elles les extrémités antérieures (par rapport à un sens de rotation donné) des trois bobines, et réunir ensuite les extrémités postérieures libres de chaque circuit respectivement à chacune des trois bagues du générateur (fig. 43).

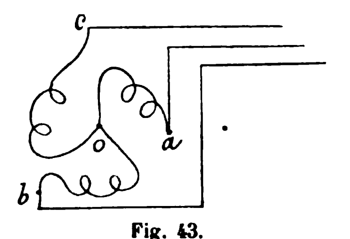


Fig. 43.

Cette disposition des circuits s'appelle disposition *en étoile*.

Une disposition analogue s'applique aux récepteurs.

Pour les courants d'ordre plus grand que 3 on a également deux sortes de distributions en polygone et en étoile.

92. Multiplication des phases. — Un système de courants polyphasés d'ordre impair, triphasés par exemple, peut alimenter des bobines polyphasées d'ordre double, hexaphasées par exemple. Considérons les trois courants triphasés que nous désignons par leurs décalages :

$$0 \quad \frac{T}{3} \quad \frac{2T}{3}$$

Le courant 0 est toujours égal et de signe contraire au courant qui serait décalé de $\frac{T}{2}$ ou $\frac{3T}{6}$; le courant $\frac{T}{3}$ est toujours égal et de signe contraire au courant qui serait décalé de :

$$\frac{T}{3} + \frac{T}{2} \text{ ou } \frac{5T}{6}$$

Le courant $\frac{2T}{3}$ est toujours égal et de signe contraire au courant qui serait décalé de : $\frac{2T}{3} - \frac{T}{2}$ ou $\frac{T}{6}$

Désignons par $a_0\ b_0$, $a_1\ b_1$, $a_2\ b_2$, $a_3\ b_3$, $a_4\ b_4$, $a_5\ b_5$, six bobines identiques ; soit $a\ b$ le sens positif des courants.

Soient I_1, I_2, I_3 les trois courants triphasés.

Faisons traverser les bobines :

a_0 b_0 par le courant triphasé I_1 en sens direct,

a_1 b_1 — — I_3 en sens inverse,

a_2 b_2 — — I_2 en sens direct,

a_3 b_3 — — I_1 en sens inverse,

a_4 b_4 — — I_3 en sens direct,

a_5 b_5 — — I_2 en sens inverse;

on voit immédiatement que les six bobines sont traversées par des courants décalés par rapport à la première de :

$$0, \frac{T}{6}, \frac{2T}{6}, \frac{3T}{6}, \frac{4T}{6}, \frac{5T}{6},$$

c'est-à-dire décalés, l'un par rapport au suivant, de $\frac{1}{6}$ de période.

Avec un générateur à courants triphasés, on peut donc alimenter un récepteur à courants hexaphasés.

La multiplication des phases est parfois avantageuse dans certaines applications mécaniques.

93. Champ magnétique tournant. — On peut réaliser au moyen des courants polyphasés un champ magnétique tournant, sans qu'il y ait de rotation mécanique de bobines ou d'aimants.

Pour fixer les idées, prenons des courants triphasés. Considérons les trois bobines disposées de manière que leurs axes forment un triangle équilatéral. Soient i_1, i_2, i_3 les intensités des courants qui à un même instant parcourent les trois bobines; cherchons le champ magnétique produit par elles au centre de ce triangle; ce champ est la résultante des trois champs composants, produits par chacune des bobines individuellement.

A un instant donné, cette résultante a une certaine direction et une certaine grandeur, soit F le vecteur qui la représente (fig. 44).

Au bout du temps $\frac{T}{3}$, les intensités des courants ont changé

dans les trois bobines par permutation tournante, i_1 est devenu i_2, i_2 est devenu i_3, i_3 est devenu i_1.

Le champ magnétique est le même que celui qui aurait été produit, si les courants primitifs étaient restés constants et si le système des trois bobines avait tourné solidairement autour du centre du triangle d'un angle de 120°, de façon à amener la coïncidence de la bobine A_2 avec la position primitive de la bobine A_1, de la bobine A_3 avec la position primitive de la bobine A_2 et de même pour A_1 et A_3, c'est-à-dire d'une bobine traversée par un courant en avance vers la bobine voisine traversée par un courant en retard, ce que nous exprimons en disant : Au bout du temps $\frac{T}{3}$ le champ résultant a la même intensité qu'au commencement ; mais sa direction a tourné de $\frac{2\pi}{3}$ ou 120°, des bobines en avance vers les bobines en retard ; il est donc représenté par le vecteur F′ égal à F et faisant avec ce dernier un angle de 120°.

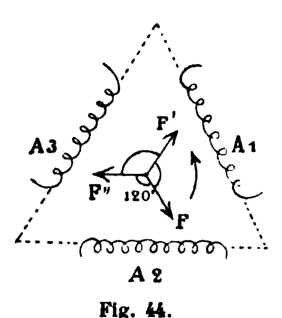


Fig. 44.

De même, au bout du temps $\frac{2T}{3}$, le champ résultant est représenté par le vecteur F″ égal à F et F′ et faisant un angle de 120° avec F′. Au bout de $\frac{3T}{3}$ ou T, le vecteur représentant le champ résultant est revenu en F et ainsi de suite.

D'autre part, le champ créé par une des bobines est dirigé suivant une direction bien déterminée et varie comme le courant d'une façon continue ; la résultante des trois champs créés simultanément par les trois bobines varie donc d'une façon continue en grandeur et en direction. Par suite, *la résultante tourne d'une façon continue dans le plan des axes des bobines en faisant un tour par période, d'une bobine en avance vers la bobine voisine en retard.*

Le champ reprend au moins trois fois par tour la même

intensité ; suivant deux directions quelconques faisant entre elles un angle de 120°, le champ reprend la même intensité à un tiers de période d'intervalle. Entre ces positions, le champ peut avoir une autre intensité.

Si les bobines sont au nombre de 6, leurs axes décalés de 60°, et alimentées en hexaphasé, le champ reprend au moins 6 fois par tour la même intensité, suivant des azimuths différant de 60°, à un $\frac{1}{3}$ de tour de période d'intervalle ; il tourne plus régulièrement et a une intensité plus constante.

Revenons au cas du système triphasé. Au lieu de placer trois bobines de façon que leurs axes dessinent un triangle équilatéral, associons en six dont les axes soient décalés de 60° et dessinent un hexagone régulier. Faisons parcourir ces bobines par des courants triphasés, de façon que si on fait le tour de l'hexagone, le courant d'une bobine soit décalé en avance de $\frac{1}{3}$ de période sur le courant de la suivante. On voit sans peine que le champ résultant au centre de l'hexagone tourne d'un demi-tour en une période, c'est-à-dire fait un tour complet toutes les deux périodes.

En décalant les axes des bobines de $\frac{360°}{9}$, on réaliserait un champ faisant un tour par trois périodes et ainsi de suite.

En décalant les axes de 4 bobines de 90°, et les faisant traverser par des courants diphasés, on réalise un champ tournant. On voit aisément comment on produirait un champ tournant avec des courants polyphasés d'ordre quelconque.

On peut montrer ces champs tournants en les faisant agir sur une aiguille magnétique mobile sur un pivot ; en donnant à l'aiguille une première impulsion assez forte dans le sens du mouvement du champ tournant, elle continue à tourner.

94. Principe des moteurs à champ tournant. — Quand on place un conducteur quelconque dans un champ magné-



tique tournant, ce conducteur est le siège d'un flux alternatif et par suite d'un courant alternatif.

Entre ce champ et le conducteur traversé par le courant induit s'exercent des actions électromagnétiques.

D'après la loi de Lenz, les forces électromagnétiques agissantes s'opposent au mouvement relatif du champ par rapport au conducteur, il faut donc que le conducteur soit sollicité par des forces qui tendent à le faire tourner dans le sens du champ tournant.

Un conducteur mobile placé dans un champ tournant sera donc entraîné dans le sens de ce champ; ce conducteur constitüera un moteur à champ tournant.

CHAPITRE XIII

MOTEURS ASYNCHRONES

95. Stator et rotor. — Dans un moteur à champ tournant, l'appareil qui est immobile et reçoit les courants polyphasés, s'appelle le *stator* ; l'appareil qui tourne grâce aux réactions réciproques du champ tournant et des courants induits s'appelle le *rotor*.

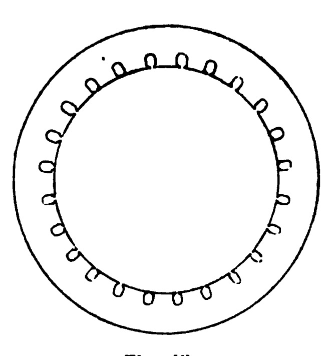


Fig. 45.

Le stator est un cylindre creux de fer doux feuilleté formé par l'empilement les unes sur les autres de tôles de fer doux présentant des dents et des trous régulièrement poinçonnés sur le contour intérieur de chacune d'elles (fig. 45). Ces tôles isolées entre elles sont ensuite empilées les unes sur les autres de façon

que les trous se correspondent et forment des rainures suivant une même génératrice de cylindre.

C'est dans ces rainures que l'on introduit les fils qui doivent être parcourus par les courants polyphasés (Pl. II).

Le rotor est un cylindre de fer doux feuilleté, formé par l'empilement les unes sur les autres de tôles isolées présentant des dents et des trous régulièrement distribués sur leur contour extérieur (fig. 46). Ces trous se correspondent et forment des rainures suivant une même génératrice d'un cylindre dont l'axe passe par les centres des tôles.

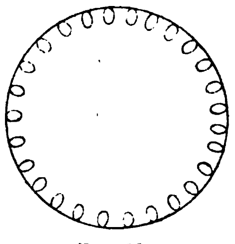


Fig. 46.

C'est dans ces trous que sont encastrés les fils ou les barres conductrices en cuivre du circuit induit du rotor (Pl. II).

Le diamètre extérieur du rotor est inférieur de 4 à 5 millimètres au diamètre intérieur du stator, de façon que, entre le fer du stator et celui du rotor, subsiste un espace ou entrefer de 2 à 3 millimètres.

Le moteur à champ tournant est dit *asynchrone* parce que, pour un courant de période donnée, il peut tourner à une vitesse quelconque (§ 103).

96. Bobinage du stator. — Supposons que les courants dans le stator soient triphasés. Le stator portera un nombre de rainures égal à un multiple de trois, soit 24. Les fils correspondant à chaque circuit ou comme on dit à chaque *phase* passent dans 8 rainures (fig. 47).

Nous supposerons que le flux créé par le stator ne crée sur la surface intérieure du stator qu'un seul pôle nord et un seul pôle sud.

Numérotons les trous 1, 2, 3, 4, 5, 6, jusqu'à 24. Dans le cas de la figure, le fil part d'une borne du stator, traverse la rainure 2, passe sur la base postérieure du stator, passe dans la rai-

nure 7, revient par la base antérieure, passe dans la rainure 2, et fait ainsi plusieurs tours en passant *n* fois en 2 et 7; après le dernier passage en 7, le fil passe dans la rainure 1 puis en 8, revient en 1

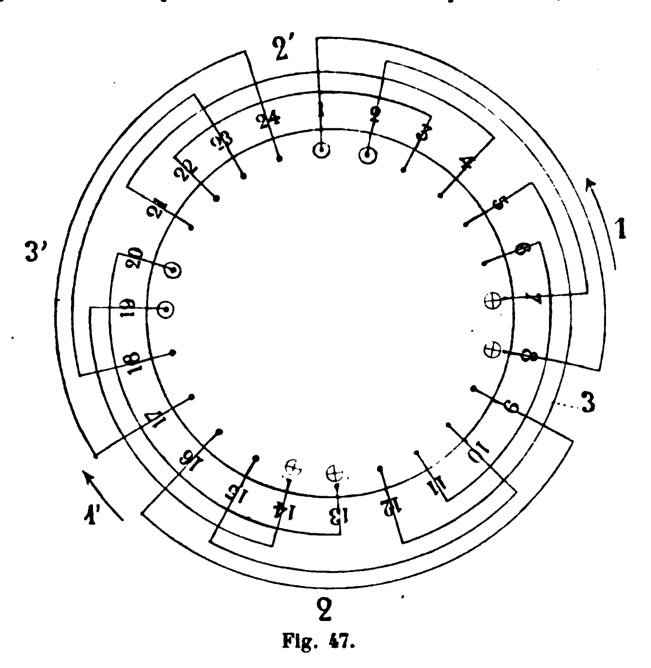


Fig. 47.

fait ainsi *n* tours en passant de 1 à 8. Il passe après d'avant en arrière en 13, puis en 20, refait *n* tours, passe en 14 et en 19, fait *n* tours et revient finalement à une deuxième borne du stator.

Pour une deuxième phase le bobinage est identique, mais simplement décalé d'un $\frac{1}{3}$ de tour, c'est-à-dire de huit trous vers les numéros croissants ou vers les numéros décroissants ; pour la troisième phase, le décalage est de huit trous sur la seconde.

Ces trois circuits peuvent être disposés en étoile ou en triangle (§ 91).

97. Champ tournant du stator. — Plaçons le rotor dans la cage magnétique du stator de façon que son axe coïncide avec

celui du rotor, et faisons passer des courants triphasés dans les circuits du stator. Le champ, en un point de l'entrefer, sera produit par les pôles magnétiques créés par les courants dans le stator et le rotor.

Supposons le rotor sans courant. A l'instant t le champ a une certaine intensité F et une certaine orientation par rapport au rayon OM et l'axe du stator en un point M de l'entrefer situé, par exemple, à la distance d comptée sur le contour d'une tôle à partir de l'axe du trou 1 ; ce champ est dû aux actions des courants triphasés i_1 dans les bobines 1 et 1', i_2 dans 2 et 2', i_3 dans 3 et 3'. Au temps $t + \frac{T}{3}$, les bobines 1 et 1' seront traversées par i_2, 2 et 2' par i_3, 3 et 3' par i_1. Comme tout est symétrique autour de l'axe du stator et que les bobinages des phases sont décalés d'un $\frac{1}{3}$ de tour, le champ aura la même valeur F et la même orientation par rapport au rayon OM' et l'axe du stator, en un point M' de l'entrefer situé à la distance d, comptée sur le contour intérieur d'une tôle dans le sens des aiguilles d'une montre, à partir de l'axe du trou 9 du stator. De sorte que pour avoir la distribution du champ magnétique à l'instant $t + \frac{T}{3}$, il suffit de remarquer que tout se passe comme si les lignes de force créées par les courants à l'instant t avaient tourné autour de l'axe commun du stator et du rotor de l'angle $\frac{2\pi}{3}$; et ainsi de suite.

Lorsque le moteur présente la disposition des circuits décrite, le flux créé par le stator est un flux tournant avec une vitesse angulaire ω telle qu'il fait $\frac{1}{3}$ de tour par $\frac{1}{3}$ de période, c'est-à-dire un tour par période.

L'analogie de ce raisonnement avec celui du § 93 montre de quelle manière il faut faire l'enroulement, pour réaliser un champ tournant faisant un demi ou un tiers de tour par période.

98. Bobinage du rotor. — Le rotor présente un nombre de

rainures légèrement différent de celui du stator; mais il peut présenter un bobinage quelconque. Les rainures peuvent être remplies de tiges de cuivre réunies par des anneaux : on a alors le rotor *en cage d'écureuil*; ou bien les fils passant dans des rainures forment 2, 3, 4, n circuits *séparés* faisant entre eux des angles égaux, régulièrement disposés sur le rotor.

99. Champ tournant du rotor. Champ résultant. — Si le rotor tourne avec une vitesse angulaire ω_1, dans le même sens que le champ du stator, mais moins vite que lui, le flux inducteur du stator tourne par rapport au rotor, avec une vitesse angulaire $\omega - \omega_1$ appelée *glissement*, dans le même sens que le rotor; si on pose $\omega - \omega_1 = \omega' = \frac{2\pi}{T'}$ le flux fait un tour dans le rotor dans le temps T′. Ce flux crée dans chacune des barres de la cage d'écureuil, ou dans chacun des circuits séparés du rotor, des courants alternatifs de période T′, de pulsation ω'. Si le rotor comprend n circuits décalés l'un par rapport à l'autre de $\frac{1}{n}$ de tour, ces n circuits sont le siège de n courants décalés de $\frac{T'}{n}$.

Ces n courants polyphasés induits dans des bobines formant entre elles des angles $\frac{2\pi}{n}$, ou disposées suivant les côtés d'un polygone régulier de n côtés, donneraient naissance, s'ils existaient seuls, à un flux tournant par rapport au rotor avec la vitesse ω' dans le sens de rotation du champ tournant *du stator par rapport au rotor*; par conséquent, *ce flux tournera synchroniquement avec le champ du stator, avec la vitesse* ω *par rapport au stator.*

Si en un point déterminé de l'entrefer et à un instant donné, le champ tournant dû au stator est F_s et le champ tournant dû au rotor F_r, le champ résultant F sera la résultante géométrique des deux champs F_s et F_r ; et comme les deux champs composants tournent avec la même vitesse angulaire ω, autour de l'axe commun

du stator et du rotor, le champ F tournera par rapport au stator avec la vitesse angulaire ω.

100. Équation des courants dans le stator. — Soit Φ le flux résultant qui traverse l'un des circuits du stator. La rotation de ce flux engendre une force électromotrice $-\frac{d\Phi}{dt}$.

Soient v la tension pendant un temps très court dt, entre les bornes d'un des circuits polyphasés du stator, i le courant qui le parcourt et $d\Phi$ la variation du flux entrant par la face droite de ce circuit pendant ce temps dt.

$$v = ri + \frac{d\Phi}{dt}$$

Si on peut négliger ri devant $\frac{d\Phi}{dt}$, ce qui est le cas général, on a

$$(1) \qquad v = \frac{d\Phi}{dt}$$

Le flux varie d'un maximum positif $\Phi_1 = +\Phi$ à un minimum négatif, égal en valeur absolue, $\Phi_2 = -\Phi$. La plus grande différence qui existe entre les flux à des instants différents sera, d'après cela, 2Φ.

D'autre part, d'après l'égalité (1), elle sera la somme de toutes les variations de flux de même signe.

$$(2) \qquad \Phi_1 - \Phi_2 = \int_{\Phi_2}^{\Phi_1} d\Phi = \int_{\frac{T}{2}} v dt$$

cette dernière somme étant étendue à tous les temps successifs dt pour lesquels v est positif, c'est-à-dire pendant une demi-période. Il est facile de voir que, dans ces conditions, si la courbe de la tension en fonction du temps ne change pas avec le courant dans le stator, ce qui est le cas général, le second membre de la dernière égalité (2) est constant, et par conséquent $2\Phi = C^{te}$, ce que l'on exprime en disant :

Un moteur asynchrone alimenté sous tension constante, fonctionne à flux maximum constant.

Il fonctionne de même à champ maximum constant et à champ efficace constant.

Le flux maximum dans le stator, les champs maximum ou efficace dans l'entrefer sont *proportionnels à la tension* efficace aux bornes du stator.

101. Equation des courants dans le rotor. — Nous ferons la théorie en supposant que le flux résultant tourne sans déformation ni variation, autour de l'axe du rotor.

Soient F le champ dans l'entrefer sur une génératrice déterminée du rotor, l la longueur de cette génératrice et V la vitesse périphérique de cette dernière par rapport au champ tournant.

Si H est la composante radiale du champ, c'est-à-dire dirigée suivant un rayon du rotor, la force électromotrice induite dans la génératrice est (§ 32)

$$e = \mathrm{H} l v$$

si ω' est la vitesse angulaire du rotor par rapport au champ tournant, c'est-à-dire le glissement, et d la distance de la génératrice à l'axe de rotation

$$v = d\,\omega'$$

et

$$e = \mathrm{H}\, l\, d\, \omega'$$

Considérons le cas où le rotor est formé de circuits séparés rectangulaires, comprenant deux conducteurs disposés suivant des génératrices, réunis par deux autres passant sur les bases du rotor. Ces deux dernières, ne coupant pas de lignes de force, ne sont le siège d'aucune force électromotrice. La force électromotrice induite dans chaque circuit élémentaire est égale à la somme des forces électromotrices induites dans les conducteurs disposés suivant les génératrices. Si ces forces électromotrices sont égales entre elles et agissent d'une façon concordante, la force électromotrice dans le cadre est

$$e = 2.\ \mathrm{H}\, l\, d\, \omega'$$

ou encore

$$e = \mathrm{S}\, \mathrm{H}\, \omega'$$

S étant la surface d'un cadre qui est aussi dans le cas actuel la surface d'une section du rotor passant par son axe.

Dans le cas simplifié que nous étudions, le flux coupé représente la variation totale du flux à travers l'aire du cadre (§ 32).

L'intensité du courant est

$$i = \frac{S H \omega'}{R}$$

en appelant R la résistance du cadre.

L'intensité efficace de ce courant est i_e, telle que

$$i_e^2 = \frac{1}{T'} \int_{T'} \frac{S^2 H^2 \omega'^2}{R^2} dt$$

si ω' est constante on peut mettre $\frac{S^2\omega'^2}{R}$ en facteur commun ;

de plus comme $\frac{1}{T'}\int_{T'} H^2 dt$ est le carré du champ efficace H_e

$$i_e^2 = \frac{S^2 H_e^2 \omega'^2}{R^2}$$

ou enfin, en désignant par Φ_e le flux efficace SH_e,

$$(3) \qquad i_e = \frac{\omega' \Phi'_e}{R}$$

102. Couple électromagnétique appliqué au rotor. — La puissance des forces électromagnétiques appliquées sur un cadre du rotor à un instant donné est

$$p = ei$$

ou

$$p = \frac{S^2 H^2 \omega'^2}{R}$$

Cette puissance instantanée varie d'un instant à l'autre, avec le champ H, mais garde un signe constant.

La puissance moyenne pendant une période T′ du courant dans le rotor est la moyenne des puissances instantanées pendant le temps T′

$$p_m = \frac{1}{T'} \int_{T'} \frac{S^2 H^2 \omega'^2}{R} dt$$

on a

$$p_m = \frac{\Phi'^2_e \omega'^2}{R}$$

ou d'après (§ 101) (3) $p_m = \Phi'_e i_e \omega'$

Si le rotor se compose de n cadres identiques, la puissance moyenne des forces électromagnétiques qui s'exercent entre le champ tournant et le rotor sera

$$(4) \qquad P = \frac{n \Phi'^2_e \omega'^2}{R} = n\Phi'_e i_e \omega'$$

Ces forces se réduisent à un couple C dont le moment est tel qu'en le multipliant par la vitesse angulaire ω', on obtient la puissance. On a donc

$$P = C \omega'$$

d'où

$$(5) \qquad C = \frac{n \Phi'^2_e \omega'}{R} = n \Phi'_e i_e$$

Dans un moteur asynchrone de bobinage donné, alimenté sous tension constante, le moment du couple electromagnétique moteur est proportionnel au glissement et inversement proportionnel à la résistance des circuits du rotor.

Dans le cas simplifié que nous traitons, le flux efficace Φ'_e qui traverse un cadre du rotor est égal, à un facteur constant près, au flux efficace Φ_e qui traverse le circuit du stator; le flux efficace du rotor est par suite proportionnel à la tension efficace aux bornes du stator (§ 101) et l'on peut énoncer cette proposition.

A glissement constant et résistance constante, le couple est proportionnel au carré de la tension efficace.

Ce n'est pas le cas dans la pratique, surtout au démarrage, une partie des lignes de force entoure les circuits du rotor sans pénétrer dans le stator et produit un flux propre variable à travers les circuits du rotor; la théorie simplifiée que nous donnons n'en tient pas compte, elle représente suffisamment bien les phénomènes en régime normal, mais ne donne qu'une idée approchée de ce qui se passe au démarrage.

103. Puissance mécanique. Fonctionnement du moteur. — Lorsqu'on abandonne un rotor aux réactions du stator, le moteur se met en marche si le couple moteur au démarrage est supérieur au couple résistant appliqué sur son arbre ; sa vitesse croît jusqu'à ce que le couple électromagnétique moteur soit égal au couple résistant.

Pour une vitesse angulaire constante ω_1 de l'induit, c'est-à-dire un glissement donné, le couple moteur est exprimé par la formule (5) (§ 102) et égal au couple résistant appliqué sur l'arbre ; la puissance mécanique du moteur, c'est-à-dire le travail résistant effectué dans l'unité de temps, sera donc

$$P = C\omega_1$$

cette puissance sera donnée par l'application mécanique que l'on veut faire. On calcule, en général, les moteurs de façon qu'ils puissent fournir cette puissance avec un glissement en régime normal de 2 à 3 °/o de la vitesse angulaire du champ. Le fonctionnement du moteur est stable ; car, si à un moment donné la *charge*, c'est-à-dire le couple résistant, augmente brusquement, le couple résistant est momentanément supérieur au couple moteur, la vitesse angulaire du moteur diminue ; mais par cela même, le glissement augmente et le couple moteur croît avec lui (§ 102) ; si donc l'augmentation de la charge n'est pas excessive, le moteur atteindra de nouveau une vitesse uniforme.

Si on enlève toutes les résistances, la vitesse du moteur s'accélère jusqu'à ce qu'il tourne sensiblement avec la même vitesse que le champ. Si on pouvait supprimer les frottements intérieurs du moteur, la vitesse du moteur fonctionnant à vide serait rigoureusement celle du champ tournant.

Si la charge varie de zéro à la normale, la vitesse du rotor ne se modifiera donc que de 2 à 3 °/o, elle sera sensiblement indé-

pendante de la charge ; le moteur asynchrone sera excellent pour la commande des machines-outils.

104. Démarrage. — Au démarrage, le glissement est égal à la pulsation du champ ; si la résistance du rotor était invariable comme dans le rotor en cage d'écureuil, le couple moteur serait, d'après la théorie simplifiée, 50 fois plus grand que le couple normal pour un glissement de 2 °/₀, et le courant deviendrait lui-même 50 fois plus grand qu'en régime normal ; le rotor sans construction spéciale ne pourrait le supporter sans être brûlé. Dans la réalité, à cause de la dispersion du flux du moteur (§ 102), les phénomènes sont beaucoup plus compliqués, le courant est réduit par la force contrélectromotrice engendrée par le flux propre variable du rotor.

En général, on n'établit pas une aussi grande différence entre le couple au démarrage et le couple normal ; on bobine le rotor en trois circuits séparés disposés en étoile (§ 91). Trois extrémités homologues sont réunies à un point neutre intérieur au rotor ; les trois extrémités libres des trois circuits sont joints métalliquement à trois bagues en cuivre isolées et tournées sur l'axe du rotor. Sur ces trois bagues, appuient trois balais métalliques réunis à trois extrémités de trois résistances dont les trois autres sont soudées en un autre point neutre.

De cette manière, on pourra au démarrage, introduire des résistances supplémentaires dans les circuits du rotor et réduire l'intensité des courants à la limite de sécurité pour un couple deux, trois fois égal au couple normal. Le moteur asynchrone peut servir de moteur de traction.

105. Courants watté et déwatté. — Dans un moteur alimenté à tension efficace constante, le courant watté pris par

chaque circuit ou phase du stator est proportionnel à la puissance demandée au moteur.

Le courant déwatté nécessaire pour aimanter le stator est sensiblement indépendant de la charge du stator en régime normal. En effet, nous avons vu que l'induction maximum de la carcasse magnétique ne change pas avec le courant pris par le stator ; d'autre part, en régime normal, le courant déwatté nécessaire pour l'aimantation du rotor est très faible par rapport à celui nécessité pour l'aimantation du stator. En effet, le rotor a sensiblement le volume du stator, l'induction maximum y atteint la même valeur que dans le stator et le glissement est très faible ; pour ces raisons, l'énergie dépensée dans le changement d'aimantation de la carcasse du rotor, en un quart de période du courant du stator, sera négligeable devant celle qui est dépensée dans l'aimantation du stator ; ceci serait complètement faux au démarrage, car la pulsation des courants dans le rotor est alors la même que dans le stator.

Le courant déwatté est en retard sur la tension ; il suffit de remarquer pour le voir, que, pour un glissement nul, le moteur asynchrone fonctionne comme une bobine de self (le rotor ne changeant pas son aimantation). Le courant total pris par le stator, et le déphasage se déduisent de la règle des vecteurs (§ 67).

Le courant déwatté est de l'ordre de la moitié ou du tiers du courant total.

106. Génératrice asynchrone. — Pour faire la théorie des courants dans le rotor, nous avons supposé que le rotor tournait moins vite que le champ tournant ; on peut supposer aussi bien que le rotor tourne plus vite ; on retrouve les mêmes formules : pour une même valeur absolue du glissement, le courant et le couple moteur sont les mêmes dans les deux cas.

Appliquons la loi de Lenz au cas où le rotor tourne plus vite que le champ. Les forces électromagnétiques, étant toujours dirigées dans un sens tel qu'elles tendent à entraver le mouvement *relatif* du champ par rapport au rotor, tendront dans ce cas particulier à diminuer la vitesse du rotor. Par conséquent pour maintenir la vitesse à une valeur supérieure à celle du champ, il faut appliquer un couple mécanique *moteur* sur l'axe du rotor ; le moteur asynchrone, au lieu d'effectuer un travail résistant, absorbera un travail moteur; le moteur devient ainsi un *générateur.*

Le rotor n'absorbant pas toute cette puissance, le stator sera le siège d'un courant watté négatif de même fréquence que le courant de l'alternateur relié à ses bornes, quelle que soit la vitesse du rotor. La pulsation des courants induits dans le stator est indépendante de cette vitesse ; c'est pour cela que ce générateur est dit *asynchrone,* par opposition aux alternateurs décrits chapitre IX qui sont dits *synchrones* parce que leur pulsation dépend de la vitesse. Cette indépendance de la pulsation de la vitesse des génératrices asynchones s'explique par l'invariabilité de la vitesse du champ tournant qui les induit (§ 99).

Les génératrices asynchrones sont susceptibles d'applications intéressantes.

Si les appareils branchés sur les lignes émanées des bornes d'un alternateur synchrone demandent une puissance supérieure à celle que ce dernier peut fournir, il suffit de faire tourner plus vite que le champ tournant le rotor d'une génératrice asynchrone capable de fournir la puissance supplémentaire.

Dans la traction par courants polyphasés, le glissement étant 2 à 3 °/o; le moteur devient générateur si, dans les descentes, on laisse croître la vitesse au-dessus de la normale en palier de 5 °/o environ, ce qui n'a rien d'exagéré ; le moteur devient lui-même son

propre frein et restitue à la station centrale pendant la descente une partie de la puissance qu'il lui a empruntée à la montée.

CHAPITRE XIV

MOTEURS SYNCHRONES. — COUPLAGE DES ALTERNATEURS

107. Réversibilité des alternateurs.— Lorsqu'un alternateur mû par des forces extérieures produit du courant, les forces électromagnétiques qui s'exercent entre l'inducteur et l'induit ont, d'après la loi de Lenz, un sens tel *qu'elles s'opposent* au mouvement.

Dans l'induit de l'alternateur tournant à sa vitesse, faisons passer artificiellement un courant alternatif qui soit à chaque instant de signe contraire à celui que cet alternateur engendrerait en tournant à cette vitesse dans le champ de ses inducteurs. Les forces électromagnétiques changeant de sens avec le courant deviendront motrices; les forces extérieures appliquées sur son arbre pourront être résistantes, l'alternateur devient un moteur.

108. Influence du décalage. — Étudions avec plus de détail les phénomènes présentés par l'alternateur.

Soit un alternateur fournissant un courant décalé de θ par rapport à sa force électromotrice génératrice. Par définition (§ 57), à chaque demi-période, pendant un temps égal à l'excès $\frac{T}{2} - \theta$ de la demi-période sur le décalage, le courant a le même sens que celui que le mouvement de l'induit dans le champ magnétique inducteur produirait seul; d'après la loi de Lenz, les actions électromagnétiques qui s'exercent entre l'induit et l'inducteur gênent le mouvement.

Pendant un temps égal au décalage θ, le courant a le signe contraire de celui de la force électromotrice génératrice : le courant réel est de sens contraire à celui qu'y engendrerait la force électromotrice génératrice seule ; les actions électromagnétiques deviennent motrices ; au lieu de gêner le mouvement, elles le favorisent.

Les forces électromagnétiques qui s'exercent sur l'induit d'un alternateur effectuent donc tour à tour un travail résistant ou moteur.

Mais dans un alternateur qui produit du courant, le décalage est toujours inférieur à $\frac{T}{4}$; pendant chaque demi-période le travail résistant des forces électromagnétiques est supérieur à leur travail moteur. Un alternateur générateur est donc soumis à des forces électromagnétiques qui gênent son mouvement.

Si artificiellement on fait passer dans l'induit tournant à une certaine vitesse le courant d'un alternateur identique, tournant à la même vitesse et tel que ce courant soit en retard par rapport à la force électromotrice de $\frac{T}{4}$ à $\frac{T}{2}$, le travail moteur des forces électromagnétiques pendant chaque demi-période devient supérieur au travail résistant ; l'alternateur devient un moteur.

109. Moteur synchrone. — Nous allons montrer que, dans ces conditions, ce moteur continuera à tourner rigoureusement à la même vitesse que le générateur, quelle que soit la puissance demandée au moteur (pourvu qu'elle soit inférieure à une certaine limite) ; pour cette raison le premier alternateur sera dit un moteur *synchrone* (de l'alternateur qui l'alimente) [1].

Appliquons sur l'arbre du moteur des résistances telles que le moteur fournisse une puissance P.

[1] Il n'est pas indispensable que l'alternateur soit identique au moteur synchrone. Il suffit, comme on le voit dans la suite, que l'alternateur fournisse une force électromotrice de même période que la force contrélectromotrice du moteur.

Le moteur sera un récepteur mécanique dont la puissance dépendra du décalage, comme il a été indiqué § 63 et 65.

Rappelons-nous aussi que l'avance de la force électromotrice sur le courant dépendra de la position de l'induit de l'alternateur par rapport à ses inducteurs au moment où le courant passe par zéro du négatif au positif (§ 73); si on compte cette avance de o à T, l'avance diminue quand le moteur ralentit, elle augmente quand le moteur accélère momentanément son mouvement.

110. Régime instable. — Supposons d'abord que le moteur tourne à sa vitesse de synchronisme et que la force électromotrice génératrice de courbe constante soit en avance de $\frac{T}{4}$ à $\frac{T}{2}$ sur le courant de courbe constante.

Si on augmente légèrement et progressivement les résistances, la puissance motrice moyenne devient momentanément inférieure à la puissance résistante ; la vitesse du moteur diminue momentanément. Si le moteur reprenait sa vitesse de synchronisme l'avance de la force électromotrice aurait diminué, et la puissance motrice du moteur aurait diminué par contre-coup. Sous l'influence de la surcharge, le moteur fonctionne donc en donnant une puissance motrice de plus en plus petite ; le moteur ralentit de plus en plus et s'arrête rapidement ; IL SE DÉCROCHE. *Un moteur synchrone ne peut donc fonctionner sous un régime stable, lorsque la force électromotrice est en avance sur le courant d'un décalage compris entre* $\frac{T}{4}$ *et* $\frac{T}{2}$.

111. Régime stable. — Supposons maintenant que l'avance de la force électromotrice sur le courant soit comprise entre $\frac{T}{2}$ et $\frac{3T}{4}$. Si on augmente les résistances, la puissance motrice moyenne devient momentanément inférieure à la puissance résistante, la vitesse du moteur diminue ; il en résulte une diminution dans l'avance de la force électromotrice ; par contre-coup, la puissance motrice augmente en tendant vers son maximum (§ 63 et 65). Ainsi donc,

quand la charge augmente, le moteur prend, de lui-même, un nouveau régime pour lequel la puissance motrice augmente ; le moteur continue à tourner à la vitesse de synchronisme. Si la décharge au lieu d'être progressive est brusque, les influences contraires agissent successivement ; le moteur revient à la vitesse de synchronisme après une série d'oscillations de vitesse au-dessus et au-dessous de cette dernière. *Pour toutes les puissances comprises entre zéro et le maximum, le moteur synchrone tourne donc toujours à la même vitesse de synchronisme ; la force électromotrice génératrice a sur le courant une avance comprise entre* $\frac{T}{2}$ *et* $\frac{3T}{4}$.

Si la puissance résistante demandée au moteur est supérieure à la puissance motrice maximum, la vitesse du moteur diminue rapidement ; le moteur s'arrête, il se décroche.

Pour éviter qu'il se décroche sous l'influence d'une surcharge occasionnelle, on le fera fonctionner, pratiquement, pour une puissance d'environ la moitié de la puissance motrice maximum qu'il peut fournir.

112. Conséquences du décrochage. — Le décrochage du moteur alimenté sous tension constante [1] augmente le courant pris par le moteur dans des proportions considérables, telles que l'induit serait brûlé, s'il restait sur le circuit.

En effet, si V est la tension aux bornes du moteur, r la résistance de l'induit et e la force électromotrice induite, on a $V = ri - e$.

Le maximum du terme ri est petit devant le maximum de v, quand le moteur tourne au synchronisme.

Si le moteur s'arrête, la force électromotrice génératrice s'annule et la force électromotrice de self-induction reste seule ; ri devient une fraction notablement plus grande de v.

[1] Cette expression signifie courbe de tension constante ou tension efficace constante.

A tension efficace constante, le courant devient notablement plus grand que celui que le moteur peut normalement supporter ; par le décrochage, l'induit du moteur serait donc brûlé ; pour éviter cet accident, on met sur le circuit de l'induit des appareils tels que des plombs fusibles qui, par leur fusion sous un courant suffisant, mettent le moteur hors circuit au décrochage, avant que le courant n'ait atteint une valeur dangereuse.

113. Étude des variations d'excitation. — Considérons un moteur synchrone fonctionnant sous une excitation donnée et fournissant une puissance P. Cherchons le changement de régime apporté par une variation de l'excitation des inducteurs.

L'excitation minimum sous laquelle le moteur pourra fonctionner, sera telle que la force électromotrice génératrice induite soit en retard sur le courant de $\frac{T}{2}$ en donnant une puissance P.

Si on augmente progressivement l'excitation, les forces électromagnétiques deviennent plus intenses, la vitesse commence donc par s'accélérer, l'avance de la force électromotrice sur le courant tend à croître ; mais par l'augmentation de l'avance, le moteur fonctionne sous un régime où sa puissance motrice diminue en tendant vers zéro ; un nouveau régime s'établit donc pour lequel l'avance de la force électromotrice génératrice sur le courant a augmenté. Si on fait croître l'excitation d'une façon continue, l'avance croît d'une façon continue de $\frac{T}{2}$ jusqu'à $3\frac{T}{4}$.

114. Courants déwattés des moteurs synchrones. — La force électromotrice génératrice étant en avance de $\frac{3T}{4}$ sur le courant, et la force contrélectromotrice de self-induction, en avance de $\frac{T}{4}$ sur le courant, ces deux grandeurs seront à chaque instant de signe contraire, et la force électromotrice totale sera en avance de $\frac{T}{4}$ sur le courant si la première est prépondérante, c'est-à-dire si le courant d'excitation est assez intense. Un

moteur synchrone fonctionnant à vide et *hyperexcité* sera le siège d'une force électromotrice totale induite, en avance de $\frac{3T}{4}$ sur le courant qui le parcourt ou, ce qui revient au même, *le courant qui parcourt le moteur, sera en avance de* $\frac{T}{4}$ *sur la force électromotrice totale;* si on néglige le courant watté qui est très faible à vide (§ 112), le moteur synchrone est traversé par un courant déwatté en avance de $\frac{T}{4}$ sur la tension entre ses bornes ; *le moteur synchrone joue le rôle d'un condensateur* (§ 60).

Si, entre les bornes A et B d'une distribution, on branche des moteurs ou des récepteurs inductifs comme des transformateurs, des moteurs asynchrones, demandant des courants déwattés en retard sur la tension, on pourra se proposer de brancher entre les mêmes bornes A et B un moteur synchrone hyperexcité qui soit traversé par un courant déwatté en avance, égal à la somme des courants déwattés en retard ; dans ce cas, la somme des courants déwattés qui arrivent du point de bifurcation de la distribution sera nulle.

Il suffira alors d'amener, par les lignes qui joignent les bornes du générateur aux bornes communes des récepteurs, uniquement les courants wattés nécessaires au fonctionnement des récepteurs ; ce qui permettra une économie sérieuse dans les fils de ligne s'ils sont très longs, car les courants déwattés ont en général une intensité de même ordre de grandeur que les courants wattés.

D'autre part, dans une distribution avec moteurs synchrones, le facteur de puissance de l'alternateur pourra être notablement amélioré et rendu aussi voisin de l'unité que possible (§ 66).

115. Accrochage. — Un moteur synchrone ne peut tourner qu'à une vitesse, la vitesse de synchronisme ; il ne peut donc démarrer seul, même à vide. Pour faire tourner le moteur synchrone à cette vitesse, il faut commencer par l'y amener par un moyen mécanique ou électrique.



Généralement, on emploie le procédé suivant : 1° le couple résistant est enlevé de l'arbre du moteur, et l'excitation des inducteurs est supprimée ; 2° on divise l'induit en deux dérivations dans lesquelles on intercale des bobines de résistance et self-induction différentes ; 3° on réunit les points de bifurcation de ces deux circuits aux bornes A B de la distribution ; les deux circuits sont traversés par des courants décalés entre eux et les composantes normales des champs créés par eux produisent un champ tournant (§ 93), qui entraîne l'induit à une vitesse voisine du synchronisme (§ 103) ; 4° lorsque cette vitesse est sensiblement atteinte, on excite les alternateurs et on supprime en même temps le champ tournant, en mettant les bornes auxiliaires en court-circuit [1] et laissant l'induit seul entre les bornes de la distribution.

Il peut arriver que l'on ait abandonné l'induit aux réactions de l'inducteur, pendant la fraction de période où les forces électromagnétiques sont motrices et le moteur continue à tourner à la vitesse du synchronisme, on dit qu'il est *accroché* ; ou bien, le moteur a été abandonné au moment où les forces électromagnétiques sont retardatrices ; le moteur ralentit et s'arrête rapidement, il se décroche ; on coupe aussitôt le circuit dans l'induit, et on répète la suite des quatre opérations précédentes jusqu'à ce que le moteur s'accroche ; en amenant le moteur à une vitesse un peu supérieure à la vitesse de synchronisme, on aura plus de chance de l'accrocher dès la première fois.

En résumé, un moteur synchrone ne peut fonctionner qu'à une seule vitesse, la vitesse du synchronisme pour toutes les puissances qu'il peut fournir ; il ne peut démarrer seul même à vide, il se décroche pour une surcharge momentanée, supérieure à une

[1] On joint pour cela les extrémités de la bobine auxiliaire par une barre conductrice de très faible résistance par rapport à celle de la bobine.



certaine limite ; hyperexcité, il permet d'améliorer le facteur de puissance des alternateurs de la station centrale.

116. Couplage des alternateurs. — Supposons qu'à un moment donné la puissance demandée à un générateur, branché sur un réseau d'éclairage par exemple, devienne trop considérable. Pour soutenir l'action de cet alternateur, on lui en adjoint un second qu'on couple en parallèle avec le premier.

Pour cela, on réunit les pôles instantanés de même nom des deux générateurs par des conducteurs de faible résistance, de façon que les courants fournis par chacun d'eux soient concordants dans le réseau de récepteurs branchés entre les pôles de chacun d'eux (fig. 48). Pour qu'il en soit ainsi, il faut qu'à chaque instant les fréquences des deux alternateurs soient identiques et leurs tensions aux bornes sensiblement égales.

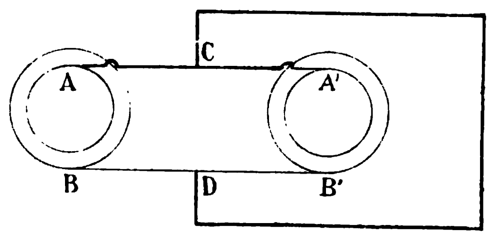


Fig. 48.

Analysons en effet ce qui se passe dans le couplage des deux alternateurs.

Si, pour l'instant t, les forces électromotrices sont égales et concordantes dans leur action sur le circuit extérieur, c'est-à-dire si chacune d'elles existant seule faisait passer un courant de même sens dans le circuit extérieur, elles se détruiront dans le circuit formé par les induits des deux alternateurs et les conducteurs qui joignent leurs bornes, circuit que j'appellerai circuit *intérieur* des alternateurs ; le courant de *circulation* dans le circuit intérieur est nul. Au contraire, quand les forces électromotrices seront égales et discordantes, c'est-à-dire si chacune d'elles existant

seule faisait passer dans le circuit extérieur un courant de sens contraire à celui que ferait passer l'autre, les forces électromotrices seront concordantes dans le circuit intérieur des alternateurs.

Par conséquent si on couple les alternateurs au moment de la *concordance* de phase, les récepteurs du réseau seront alimentés par l'action simultanée des deux alternateurs et le courant de circulation sera nul ; si on les couplait au moment de la discordance, les alternateurs seraient traversés par un courant de circulation très préjudiciable pour les machines, les récepteurs seraient privés de courant.

Les alternateurs doivent être couplés en concordance de phase.

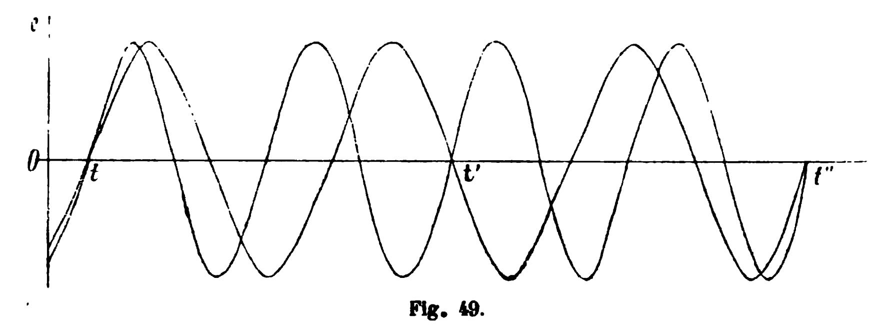


Fig. 49.

Si les fréquences des alternateurs sont différentes, ceux-ci exerceront tour à tour une action concordante ou discordante.

Supposons en effet que la fréquence du premier soit inférieure à celle du second. Traçons les courbes de force électromotrice de chacun d'eux (fig. 49). On voit immédiatement que, si elles sont concordantes à l'intant t, elles sont discordantes à l'instant t' et de nouveau concordantes à l'instant t'', et ainsi de suite. Si les alternateurs débitent sur un réseau d'éclairage, la lumière subira des éclipses qui seront d'autant plus espacées que les périodes seront plus voisines. Le courant de circulation sera tour à tour nul et maximum.

En pratique, les deux alternateurs sont identiques et mus par des moteurs différents. On ne peut obtenir des fréquences rigoureusement égales pour les deux alternateurs ; on les couple au moment où, les fréquences étant très voisines, ils sont en concordance de phase.

On se sert pour cela des remarques précédentes et on emploie le dispositif suivant : les bornes du premier alternateur étant A et B, celles du second A' et B', on relie directement les deux bornes AA' par un conducteur de faible résistance et on réunit les deux bornes BB' par l'intermédiaire de deux lampes à incandescence LL', dites *lampes de phase* ou de *synchronisation* (fig. 50) chacune de ces lampes doit pouvoir supporter la tension donnée par chaque alternateur, afin que les filaments ne puissent être brûlés. Les deux bornes B B' sont en outre réunies par un gros conducteur présentant une interruption I.

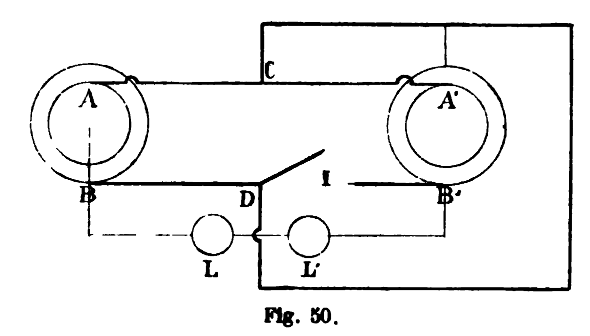


Fig. 50.

On amène le deuxième alternateur à peu près à la vitesse du premier en agissant sur l'admission de son moteur. On l'excite de façon que sa tension soit sensiblement celle du premier. Les alternateurs étant successivement en concordance et en discordance, les lampes s'éteignent et s'allument tour à tour.

Au fur et à mesure que les fréquences deviennent de plus en plus voisines, les oscillations de la lumière des lampes sont de plus en plus lentes. Lorsque l'intervalle entre deux extinctions ou deux apparitions consécutives de lumière est suffisamment long,

on met les lampes en court-circuit, au moment d'une extinction, par un conducteur de faible résistance en fermant l'interruption et les alternateurs restent couplés.

Si la vitesse de l'un d'eux devient un peu supérieure à celle de l'autre, on démontre que la différence de fréquence qui en résulte fait naître dans le circuit intérieur des deux machines des courants tels, que l'alternateur en retard fonctionne comme *moteur* synchrone de l'autre qui fonctionne comme *générateur*. Le moteur à vapeur qui conduit l'alternateur en retard est donc aidé dans sa marche ; celui qui conduit l'alternateur en avance est gêné et l'égalité de fréquence se maintient sensiblement avec de faibles oscillations. Les deux alternateurs couplés électriquement se comportent comme s'ils étaient couplés par un joint élastique et mus par un seul moteur.

CHAPITRE XV

RENDEMENT DES ALTERNATEURS ET DES MOTEURS A COURANT ALTERNATIF

117. Rendement d'un alternateur. — On appelle rendement d'un générateur le rapport de la puissance utile P_u recueillie dans le circuit extérieur qui réunit ses bornes à la puissance mécanique P dépensée pour la produire

$$(1) \qquad \text{rendement} = \frac{P_u}{P}$$

D'après le principe de la conservation de l'énergie, la puissance totale P se retrouve sous forme de puissance utile P_u et sous forme inutile p dans les diverses parties de la machine, où elle produit

des phénomènes calorifiques ; p représente les *pertes*, c'est-à-dire l'énergie perdue pour l'utilisation

$$(2) \qquad P = P_u + p$$

Pour les moteurs synchrones, le rendement a une expression analogue à (1) ; P_u représente la puissance mécanique recueillie sur la poulie, P la puissance totale fournie au moteur satisfait à l'équation (2).

118. Étude des pertes. — 1° Pour que l'alternateur puisse fonctionner, il faut exciter ses inducteurs et dépenser pour cela une puissance w_e.

2° L'alternateur tourne, une puissance w_r est nécessaire pour vaincre les frottements de l'arbre sur les paliers et la résistance de l'air.

3° L'induit qui produit un courant s'échauffe par effet Joule et consomme une puissance w_i.

4° L'armature tournant dans un champ magnétique variable, son aimantation décrit un cycle d'hystérésis par période et la puissance perdue par hystérésis est w_h.

5° Les pièces massives qui supportent les fils de l'induit, les pièces massives des inducteurs, soumises à un flux variable, sont le siège de courants de Foucault et absorbent une puissance w_f.

La somme des pertes p peut s'écrire

$$p = w_e + w_r + w_i + w_h + w_f$$

Le principe de la conservation de l'énergie veut que l'on ait

$$P = P_u + w_e + w_r + w_i + w_h + w_f$$

et le rendement est

$$\rho = \frac{P_u}{P_u + w_e + w_r + w_i + w_h + w_f}$$

Il sera d'autant plus grand que les pertes seront plus faibles. Etudions-les séparément.

1° *Excitation*. Soient i_e l'intensité du courant inducteur et r_e la résistance des inducteurs à chaud, c'est-à-dire après une durée de fonctionnement de la machine suffisante pour que la température garde une valeur stationnaire ; la puissance utilisée pour l'excitation est $r_e i_e^2$

Le courant i_e est produit par une petite dynamo auxiliaire ; si ρ_a est son rendement et si son circuit extérieur est uniquement constitué par le fil inducteur de l'alternateur sans rhéostat, la puissance totale consommée par l'excitation sera telle que

$$\frac{r\, i_e^2}{w_e} = \rho_a$$

c'est-à-dire

$$w_e = \frac{r_e\, i_e^2}{\rho_a}$$

Cette perte sera rendue aussi faible que possible en réduisant la résistance des inducteurs, c'est-à-dire en prenant de fortes sections, mais on se heurte alors à une question de prix de revient. En pratique on prend les fils des inducteurs suffisamment gros pour que leur échauffement ne compromette pas l'isolement de la machine. On choisira la dynamo de façon qu'elle produise la puissance normale correspondante à l'excitation normale de l'alternateur avec son maximum de rendement.

2° *Frottements*. On diminue les frottements sur les coussinets par le graissage, et, la résistance de l'air en donnant aux parties mobiles des formes convenables. Cependant une ventilation bien comprise est nécessaire pour éviter un échauffement excessif qui compromettrait l'isolement des fils inducteur et induit.

3° *Effet Joule dans l'induit*. On a $w_i = r_i\, i_i^2$, r_i étant la résistance de l'induit et i_i l'intensité efficace du courant qui le parcourt. On pourrait réduire la perte en diminuant la résistance, c'est-à-dire en prenant les conducteurs aussi gros que possible ;

on sera encore arrêté dans cette voie par la question du prix de revient et les dimensions de l'armature. On choisira les conducteurs de façon qu'ils ne s'échauffent pas au-delà d'une certaine température de sécurité pour l'isolement des fils, environ 70° centigrades.

4° *Hystérésis.* La perte d'énergie par cycle d'hystérésis et par décimètre cube de fer est représentée (§ 44) par la formule $w = k\ B^{1.6}$, où k est un coefficient qui dépend de la nature du fer, B, l'induction maximum. Si le courant a une fréquence de f périodes par secondes, la puissance perdue dans un volume de V décimètres cubes est

$$w_h = k\ V\ f\ B^{1,6}$$

On la rendra mininum en réduisant autant que possible les facteurs k, V, f et B.

Pour rendre k aussi petit que possible, on construit l'armature et les noyaux des inducteurs en fer doux ou acier doux recuit (§ 44).

On réduira le volume V du fer au strict minimum compatible avec les propriétés mécaniques et magnétiques demandées à la machine.

La force électromotrice moyenne d'un alternateur est sensiblement proportionnelle à la fréquence et à l'induction maximum (§ 80). On ne peut donc réduire la perte par hystérésis en diminuant f et B sans diminuer en même temps la force électromotrice et par suite la puissance de la machine. On choisira pour f et B des valeurs qui concilient les conditions de production d'une grande puissance sous le moindre volume avec le meilleur rendement.

Lorsque l'alternateur sert à l'éclairage, la fréquence ne doit pas être inférieure à 40 périodes par seconde; sans cela l'œil

perçoit les variations d'intensité lumineuse produites par la variation du courant, surtout pour les lampes à arc; il en résulte un tremblottement de lumière intolérable. S'il s'agit uniquement de moteurs, la fréquence peut être beaucoup moindre; on descend même à une vingtaine de périodes par seconde.

Dans la pratique on choisit pour l'induction maximum une valeur de 5.500 à 6.500 gauss pour 40 périodes et 5.000 à 6.000 gauss pour 50 périodes.

Pour une induction de 5.000 gauss et 50 fréquences, la perte par décimètre cube est de 8,28 watts; pour une induction de 10.000 gauss, elle est de 25 watts.

5° *Courants de Foucault*. La masse d'un conducteur (fer, cuivre) à trois dimensions placé dans un champ magnétique variable est parcourue par des courants fermés s'enveloppant les uns les autres. Si l'on isole par la pensée l'un de ces circuits, le courant qui y circule est soumis aux lois de l'induction et de Joule. La force électromotrice d'un de ces courants est égale au taux de variation du flux qui traverse l'aire du circuit parcouru par ce courant; elle est donc sensiblement proportionnelle à l'induction maximum et à la fréquence. La puissance calorifique dégagée par l'effet Joule est sensiblement proportionnelle au carré de l'induction et de la fréquence.

La puissance calorifique perdue par décimètre cube sera $g\, f^2\, B^2$ et pour le volume total V décimètres cubes

$$w_f = g\, V\, f^2\, B^2$$

g étant un coefficient qui dépend du conducteur.

On réduira les pertes en réduisant chacun des facteurs. On pourrait répéter ici pour le volume, la fréquence et l'induction ce qui a été dit à propos de l'hystérésis; quant au coefficient g, il dépend de la nature du conducteur et de sa forme. Les courants

de Foucault sont considérablement atténués dans des masses de fer feuilleté, formées par l'empilement les unes sur les autres de lames de tôle, recouvertes d'isolant, dont la surface est parallèle aux lignes de force. Les pertes sont d'autant plus faibles que l'épaisseur de la tôle est moindre. Le coefficient g est sensiblement proportionnel au carré de l'épaisseur d'une tôle. En pratique on choisit des tôles de 3 à 4 dixièmes de millimètre d'épaisseur.

Pour 50 fréquences, ces tôles de fer doux consomment 0,9 watt par décimètre cube pour une induction maximum de 5.000 gauss et 3,6 watts pour une induction maximum de 10.000 gauss.

Les courants de Foucault, outre l'effet nuisible d'absorber de l'énergie, présentent des avantages, notamment celui d'amortir les oscillations des moteurs synchrones et des alternateurs couplés (§ 116) par l'effet des forces électromagnétiques de réaction exercées d'après la loi de Lenz (§ 35). Dans ce cas, pour réduire les pertes, on adjoint à la carcasse feuilletée de l'induit des pièces massives en cuivre. Si l'on veut au contraire réduire le prix de revient et utiliser l'action amortissante des courants de Foucault, les inducteurs sont en acier doux massif; mais les pertes par courants de Foucault sont plus fortes.

119. Calcul à priori du rendement. — Remarquons tout de suite que, dans les alternateurs, le rendement pour une même puissance utile dépendra essentiellement du déphasage du courant et de la force électromotrice. Pour une même tension aux bornes et une même puissance, le courant watté gardera la même valeur et le courant déwatté, d'après la règle des vecteurs (§ 67), sera égal au produit du courant watté par la tangente du déphasage ; le courant d'excitation croîtra également avec le déphasage.

On pourra calculer à priori les pertes par effet Joule dans

l'induit et les inducteurs et les résistances des circuits induit et inducteur pour la température normale de fonctionnement.

On connaîtra de même les pertes par hystérésis et courants de Foucault si on se donne les coefficients k et g d'hystérésis et de courants de Foucault, l'épaisseur des tôles, leur volume et l'induction maximum.

Dans un alternateur triphasé de puissance réelle de 600 kilowatts, les pertes évaluées en watts pour $\cos\varphi = 1$ et $\cos\varphi = 0{,}7$ sont

	$\cos\varphi = 1$	$\cos\varphi = 0{,}7$
pertes par effet Joule dans l'inducteur. . .	4.250	11.300
pertes totales pour l'excitation avec des rendements de 0,8 et 0,9	5.213	12.585
pertes par effet Joule dans l'induit. . .	6.210	12.700
» hystérésis et courants de Foucault	14.050	14.050
» frottements mécaniques . . .	6.000	6.000
pertes totales . . .	31.473	45.335
Rendement. . . .	0,95	0,93

120. Mesure mécanique du rendement. — Si on détermine la puissance mécanique totale fournie à la machine par une mesure mécanique de puissance et la puissance électrique disponible dans le circuit extérieur par l'une des méthodes indiquées au chapitre VIII, on pourra calculer le rendement.

La mesure mécanique de la puissance est en général difficile pour les alternateurs de grande puissance. On peut tourner la difficulté par des méthodes purement électriques, que nous n'exposerons pas ici.

121. Cas des moteurs asynchrones. — On peut faire sur les moteurs à champ tournant les mêmes considérations que sur les alternateurs synchrones; les pertes par hystérésis et

courants de Foucault dans le stator subissent les mêmes lois. Dans le rotor, ces pertes se réduisent en régime normal uniquement à la chaleur dégagée dans les circuits induits du rotor ; les pertes dans le fer sont négligeables. Les pertes par effet Joule dans le rotor sont les mêmes que celles que produirait la rotation du rotor dans un champ fixe avec une vitesse angulaire égale au glissement.

On pourrait répéter ici ce qui a été dit au sujet de chaque perte au § 118.

On évalue le rendement en déterminant, par l'une des méthodes du chapitre VIII, la puissance communiquée à chaque circuit du stator ; si on mesure au frein la puissance mécanique recueillie sur l'arbre du moteur, ce rendement est comparable à celui des moteurs à courant continu ; il peut atteindre pour les moteurs de grande puissance, cent chevaux par exemple, 91 °/₀.

QUATRIÈME PARTIE

TRANSFORMATEURS ET CONVERTISSEURS

CHAPITRE XVI

TRANSFORMATEURS

122. Transport de l'énergie. — La question du transport de la force à distance, ou plus exactement du transport de l'énergie, consiste dans le problème suivant.

Supposons que l'on puisse produire l'énergie électrique à bon marché dans une station A ; il s'agit de la transporter en B, station très éloignée de la station A. On réunit A et B par deux ou plusieurs lignes conductrices ; si l'on dispose en A d'une puissance P_g, on recueillera en B cette puissance, moins les pertes dans les lignes A B ; si r est la résistance des fils, i l'intensité, la puissance perdue est ri^2. On a donc pour puissance P_u recueillie en B.

$$P_u = P_g - ri^2$$

Le rendement de la ligne est

$$\frac{P_u}{P_g} = \frac{P_g - ri^2}{P_g}$$

Le transport de l'énergie sera économique, si le rendement est voisin de l'unité, c'est-à-dire si le terme ri^2 n'est pas trop considérable par rapport à la puissance utile.

Pour diminuer ri^2, il faut diminuer r ou i.

Diminuer r revient à augmenter la section des fils, mais on augmente alors le prix de la ligne.

Diminuer i, si la tension reste constante, revient à diminuer la puissance puisqu'on a $P = Vi$.

Cette seconde solution est donc encore mauvaise, si on veut conserver une tension constante.

Mais le transport deviendra économique si, en diminuant i, on augmente V de manière que la puissance à transmettre reste constante et que l'on ait par conséquent $Vi = V'i'$.

Le transport de l'énergie doit donc se faire sous haute tension et à faible intensité.

123. Transformateurs de tension. — Sous un voltage efficace supérieur à 300 volts, les courants alternatifs ne sont jamais utilisables sans danger mortel pour les personnes qui approchent les conducteurs ; ce danger peut subsister pour une tension beaucoup moindre, cela dépend de la tension maximum et par suite de la forme du courant.

Pour éviter tout danger, il faudra, par un appareil, abaisser la tension du courant à l'arrivée, convertir le courant de haute tension et de faible débit en un courant de basse tension et de grand débit.

Les appareils qui modifient la tension du courant, s'appellent des *transformateurs de tension.* Si le générateur ne produit pas l'énergie à une tension suffisamment élevée, on l'élève par un *transformateur élévateur de tension.* A la station d'utilisation, on abaisse la tension par un transformateur *réducteur de tension.*

124. Principe des transformateurs. — La transmission de notables quantités d'énergie n'est pas sans présenter des difficultés et de gros inconvénients en courant continu. Il n'existe pas de transformateur de tension de courant continu simple et économique.

Le courant alternatif apporte, tout naturellement, la solution du problème.

On sait en effet que, si on entoure une bobine parcourue par un courant par une autre bobine, celle-ci est le siège d'un courant induit quand le courant de la première commence ou cesse et plus généralement quand ce courant varie. L'intensité du courant induit augmente dans des proportions considérables, si l'on place un noyau de fer dans l'intérieur des bobines inductrices et induites. Le courant induit peut devenir 2000 fois plus grand, si l'on a soin de placer les bobines sur un même noyau de fer doux, formant un circuit magnétique complètement fermé, § 40. Dans les transformateurs de tension, on réalise cette disposition. Avec des lames de tôle de fer doux, on fait un cadre rectangulaire formant un circuit magnétique fermé (fig. 51). Sur ce cadre on enroule les spires de la bobine inductrice et celles de la bobine induite; la bobine inductrice s'appelle le *primaire*, la bobine induite, le *secondaire* du transformateur.

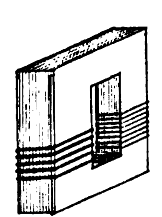


Fig. 51.

125. Théorie. — Supposons que le circuit magnétique soit parfait, c'est-à-dire tel que chaque section droite du circuit magnétique soit traversée, à un instant quelconque, par le même flux et que les flux qui traversent l'air soient négligeables devant le flux qui traverse le fer, ce que l'on exprime en disant qu'il n'y a pas de *fuites magnétiques*. Soient v_1 la tension entre les bornes

du primaire, que nous supposons à gros fil pour fixer les idées, et v_2 celle relative au fil fin qui est alors le secondaire.

Choisissons un sens positif de courant primaire. A un moment donné, il se produit une variation de flux dans les spires; le primaire est le siège d'une force électromotrice d'induction. Si Φ est le flux traversant chaque spire en pénétrant par sa face droite, le flux qui traverse les spires de la bobine primaire sera $n_1 \Phi$ et la force électromotrice sera $-n_1 \frac{d\Phi}{dt}$.

$$\text{Or on a } v_1 = r_1 i_1 - e_1 \text{ avec } e_1 = -n_1 \frac{d\Phi_1}{dt}$$

$$\text{On a donc} \qquad v_1 = r_1 i_1 + n_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

Faisons de même pour le secondaire et considérons la tension v_2 qui existe aux extrémités de la bobine secondaire à l'instant où la tension v_1 est appliquée aux bornes du primaire. Le flux qui traverse chaque spire du secondaire est le même Φ en grandeur et en signe, si nous supposons que le courant parcourt les spires secondaires dans le même sens que les spires primaires.

Les n_2 spires du secondaire seront traversées par le flux $n_2 \Phi$ et elles seront le siège d'une force électromotrice d'induction

$$e_2 = -n_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

On aura donc si r_2 et i_2 représentent la résistance et l'intensité du courant du secondaire

$$v_2 = r_2 i_2 + n_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

On a remarqué que, dans les transformateurs ainsi construits, la valeur maximum du terme ri est très petite vis-à-vis de la valeur de $n \frac{d\Phi}{dt}$, (§ 128). On peut donc le négliger et écrire approximativement

$$v_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt} \qquad (1)$$

$$v_2 = n_2 \frac{d\Phi}{dt} \qquad (2)$$

Il en résulte immédiatement cette relation remarquable :

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{n_2}{n_1} \qquad (3)$$

A un instant donné quelconque, la tension aux bornes du secondaire est à la tension aux bornes du primaire dans le rapport constant $\frac{n_2}{n_1}$ du nombre de spires du secondaire au nombre de spires du primaire.

126. Rapport de transformation. — Le rapport $K = \frac{n_2}{n_1}$ s'appelle le rapport de transformation.

Le rôle du transformateur consiste donc à changer la tension d'un courant dans un rapport constant.

Si $n_2 > n_1$, $v_2 > v_1$, le transformateur élève la tension.

Si $n_2 < n_1$, $v_2 < v_1$, le transformateur abaisse la tension.

Un même transformateur élève ou abaisse la tension suivant que le courant inducteur passe dans l'une ou l'autre bobine.

Si le diagramme des tensions v_1 est tracé, on voit que si l'on a v_1 à un instant donné t, pour avoir v_2 au même instant il n'y a qu'à réduire ou augmenter les ordonnées d'une même abscisse, dans le rapport constant $\frac{n_2}{n_1}$.

127. Tension efficace. — A un instant donné, on a $\frac{v_2}{v_1} = \frac{n_2}{n_1}$.

Élevons au carré et multiplions le numérateur et le dénominateur par dt, dt représentant un temps assez court pour qu'on puisse considérer les tensions comme sensiblement constantes pendant ce temps, les variations de tension étant très petites par rapport à la tension elle-même, on a : $\frac{v_2^2\,dt}{v_1^2\,dt} = \frac{n_2^2}{n_1^2} = K^2$.

Si, pour tous les temps très courts dt, dt'...., en lesquels on peut décomposer une période, on fait la même opération, on a en désignant par v_1 v_2 v_1' v_2' les tensions pendant les temps dt, dt',

$$\frac{n_2^2}{n_1^2} = \frac{v_2^2dt}{v_1^2dt} = \frac{v_2'^2dt'}{v_1'^2dt'} = \ldots = \frac{v_2^2dt + v_2'^2dt' +}{v_1^2dt + v_1'^2dt' +} = \frac{\frac{1}{T}\int_T v_2^2\,dt}{\frac{1}{T}\int_T v_1^2\,dt}.$$

Or
$$\frac{\frac{1}{T}\int_T v_2^2\, dt}{\frac{1}{T}\int_T v_1^2\, dt} = \frac{v_{e_2}^2}{v_{e_1}^2} = \frac{n_2^2}{n_1^2}$$

d'où :
$$\frac{v_{e_2}}{v_{e_1}} = \frac{n_2}{n_1}.$$

La tension efficace aux bornes du secondaire et la tension efficace aux bornes du primaire sont entre elles dans un rapport constant $\frac{n_2}{n_1}$.

128. Justification de la théorie. — Nous avons négligé le terme *ri*. L'expérience justifie-t-elle ce procédé ?

Prenons à cet effet un transformateur calculé et construit par Kapp et voyons ce qu'on néglige :

Soient $n_1 = 1350$ $n_2 = 70$

i_2 maximum $= 150$ ampères

$r_2 = 0^{\text{ohm}},00682$

B induction maxima = 5000 gauss.

S = 130 centimètres carrés.

Fréquence de l'alternateur = 50.

Calculons la valeur moyenne de $n_2 \frac{d\Phi}{dt}$.

Prenons pour $\frac{d\Phi}{dt}$ une valeur moyenne approximative $= \frac{\Phi_{max}}{\frac{T}{4}}$.

Calculons ce terme en unités pratiques.

B = 5000×10^{10} unités pratiques d'induction (§ 29).

S = 130×10^{18} unités pratiques de surface.

$\Phi_{max} = \text{B S} = \frac{5.000 \times 130}{10^8} = \frac{650.000}{10^8}$ unités pratiques de flux.

$\text{T} = \frac{1}{\text{fréquence}} = \frac{1}{50};\ \frac{\text{T}}{4} = \frac{1}{200}.$

Donc $\frac{d\Phi}{dt}$ moyen, c'est-à-dire $\frac{\Phi_{max}}{\frac{T}{4}} = \frac{650.000 \times 200}{10^8} = 1,3$ environ.

$$n_2 \frac{d\Phi}{dt} \text{ moyen} = 91 \text{ unités pratiques.}$$

Le courant moyen i_2 est approximativement $\frac{150}{2}$ ou 75 amp.

Donc $r_2\, i_2$ moyen $= 75 \times 0,00682 = 0,^{\text{volt}}51$.

Par suite $\frac{r_2\, i_2 \text{ moyen}}{n_2 \frac{d\Phi}{dt} \text{ moyen}} = \frac{0,51}{91} =$ environ : 0,006.

En négligeant $r\,i$ devant $n\,\frac{d\Phi}{dt}$, on néglige donc seulement les 6 millièmes environ de la valeur de V, ce qui est très admissible.

129. Régulation de la tension. — Si la tension primaire reste constante, on voit que la tension secondaire reste aussi constante, à l'approximation près que nous venons de justifier.

Il résulte de là que le transformateur décrit est en même temps *autorégulateur* de tension. Il suffit que l'on maintienne la tension efficace constante aux bornes du primaire du transformateur pour que la tension aux bornes du secondaire le soit aussi, ou à très peu près, quel que soit le courant débité par le secondaire. Cette propriété sert de base à un mode de distribution d'énergie par courants alternatifs.

On produit l'énergie électrique à haute tension dans une station génératrice, par un alternateur auquel on ajoute ou non un transformateur ; on la transporte par des fils fins à l'endroit où on veut l'utiliser. Si les récepteurs sont groupés autour d'un point central (ce qui arrive dans une agglomération quelconque), on place un seul transformateur en ce point et on réunit les bornes du secondaire à basse tension aux divers récepteurs. Le point central s'appelle une *sous-station*.

Les fils qui transportent l'énergie à basse tension, de la sous-

station chez les abonnés, sont en cuivre et de section très grande par rapport aux fils de haute tension ; on comprend alors que ce mode de distribution cesse d'être économique, lorsque les récepteurs sont trop éloignés de la sous-station. Lorsque les lieux d'utilisation de l'énergie sont très disséminés et très éloignés les uns des autres, on a intérêt à placer un transformateur chez chaque abonné.

CHAPITRE XVII

RENDEMENT DES TRANSFORMATEURS

Le transport et la distribution de l'énergie par les transformateurs seront pratiques si le rendement de la transformation n'est pas trop faible. Examinons cette question.

130. Étude du flux. — Les équations du transformateur, sans fuites magnétiques ni chutes ohmiques sensibles, sont, § 125 :

$$(1) \qquad v_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt} \qquad\qquad (2) \qquad v_2 = n_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

où les indices 1 et 2 sont relatifs, l'un au circuit primaire et l'autre au circuit secondaire.

Remarquons que, d'après l'équation (1), le flux Φ croît toujours tant que v_1 est positif.

Or v_1 est positif pendant une demi-période. Évaluons tous les accroissements successifs du flux pendant cette demi-période où v_1 est positif.

On a pendant un premier intervalle de temps dt :

$$d\Phi = \frac{1}{n_1} v_1 \, dt$$

et pendant les intervalles successifs suivants : $dt' \ldots\ldots dt^p$

$$d\Phi' = \frac{1}{n_1} v_1' dt'$$

. . . . . .

. . . . . .

$$d\Phi^p = \frac{1}{n_1} v_1^p dt^p$$

la somme de toute les variations de flux pendant $\frac{T}{2}$ est

$$\int_{\frac{T}{2}} d\Phi = \frac{1}{n_1} \int_{\frac{T}{2}} v_1 dt$$

Le premier membre de cette égalité représente évidemment le plus grand écart possible entre deux flux, c'est-à-dire l'augmentation du flux depuis le minimum jusqu'au maximum, c'est-à-dire le flux maximum moins le flux minimum. Soient Φ_m et Φ'_m ces deux flux; si le courant alternatif oscille entre deux valeurs égales et de signes contraires, le flux maximum et le flux minimum sont aussi égaux et de signes contraires, en sorte que l'on a :

$$\Phi'_m = - \Phi_m$$

Il en résulte : $2 \Phi_m = \frac{1}{n_1} \int_{\frac{T}{2}} v_1 dt$

Et par suite : Φ_m (flux maximum) $= \frac{1}{2 n_1} \int_{\frac{T}{2}} v_1 dt$

Or si, quel que soit le courant pris au secondaire, la courbe de la tension en fonction du temps reste la même, la valeur de la somme $\int_{\frac{T}{2}} v_1 dt$ reste constante quelle que soit l'énergie débitée. Le flux maximum Φ_m reste donc constant, quel que soit le courant débité par le secondaire.

Lorsque le secondaire ne débite pas de courant, on dit que le transformateur travaille à vide ; s'il débite un courant, on dit que le transformateur est en charge.

La propriété précédente se traduit donc de la façon suivante :

A vide ou en charge, le transformateur alimenté à tension constante travaille toujours dans le même flux.

D'autre part, en représentant par B l'induction maxima et par S la section du noyau, on a :

$$\Phi_m = B \times S$$

Or la section S est constante, donc B reste constant quand la tension maximum est constante, d'où cette seconde proposition, corollaire de la première : *A vide ou en charge, un transformateur alimenté à tension constante travaille toujours à la même induction maxima.*

131. Pertes dans le fer. — Dans un transformateur fait avec des tôles de coefficient d'hystérésis k, de volume total V, alimenté par un courant de fréquence f, sous une induction maximum B, la puissance perdue par hystérésis a pour valeur (§ 118)

$$H = k\, V f\, B^{1,6}$$

La puissance perdue par le fait des courants de Foucault est (§ 118) :

$$G = g\, V f^2\, B^2.$$

en désignant par g le coefficient correspondant aux tôles employées.

Lorsque la courbe de la tension reste la même, quelle que soit la charge, B est constant à vide et à charge ; les pertes H et G sont donc constantes dans les mêmes conditions. La somme $F = H + G$ qui représente la perte totale dans le fer est constante.

Dans un transformateur donné, la tension étant maintenue constante aux bornes du primaire, les pertes dans le fer sont constantes, quelle que soit la charge.

Nous avons étudié ces pertes dans le paragraphe 118, nous nous contenterons d'étudier ici l'influence de l'induction maximum B.

Pour un transformateur donné, B est proportionnel à Φ_m, car $\Phi_m = B \times S$.

$$\text{Or } \Phi_m = \frac{1}{2 n_1} \int_{\frac{T}{2}} v_1 \, dt.$$

Pour un courant primaire donné, le flux maximum est en raison inverse de n_1.

Donc, pour un courant primaire donné et un cadre de fer donné, pour réduire les pertes dans le fer il faut augmenter n_1, et par suite si l'on ne veut pas changer le rapport de transformation $\frac{n_2}{n_1}$ il faut augmenter n_2 dans la même proportion.

En définitive, on peut toujours réduire les pertes dans le fer en constituant le noyau de fer feuilleté avec des tôles douces bien recuites et en augmentant le nombre de spires du primaire et du secondaire, ce qui augmentera les pertes dans le cuivre.

132. Pertes dans le cuivre. — Etudions maintenant les pertes dans le cuivre, dues aux effets Joule dans les enroulements du transformateur.

Soient i_{1e} et r_1, l'intensité efficace et la résistance dans le circuit primaire ; i_{2e} et r_2, les valeurs correspondantes dans le circuit secondaire.

La puissance perdue dans le primaire par l'effet Joule est $r_1 i_{1e}^2$, et celle perdue dans le secondaire est $r_2 i_2{}^2{}_e$.

La perte totale dans le cuivre est donc :

$$C = r_1 i_{1e}^2 + r_2 i_2{}^2{}_e.$$

Pour des courants donnés dans le primaire et dans le secondaire, on voit que l'on réduit les pertes en réduisant les résistances r_1 et r_2 ; on est donc conduit à augmenter les sections des fils pour une longueur donnée de fil ou un nombre donné de spires ; or, ici, on est encore arrêté en pratique par le prix de revient et par l'espace disponible pour loger les bobines.

On ne donnera aux enroulements primaire et secondaire que des sections suffisantes pour que le dégagement de chaleur n'élève pas la température du transformateur au-dessus d'une certaine limite de sécurité : 70 degrés centigrades par exemple. On admet qu'un courant de un à deux ampères par millimètre carré de section est le maximum de courant qu'un câble de transformateur peut supporter, sans s'échauffer au-dessus de cette température. Cette condition sera en outre favorable pour atténuer la chute ohmique de tension dans les enroulements.

133. Maximum du rendement. — Soit P la puissance utile disponible entre les bornes du secondaire ; la puissance totale communiquée au primaire est égale à la somme de la puissance utile et des pertes, c'est-à-dire à P + F + C.

Le rendement a donc pour expression le rapport $\frac{P}{P+F+C}$

On peut lui donner une forme remarquable.

En effet la puissance utile d'un transformateur travaillant dans des conditions données est proportionnelle à i_{2e}. On a $i_{2e} = aP$, a étant une constante.

De même si la tension efficace primaire reste constante, on peut écrire : $i_{1e} = b\,P'$, b étant une constante, P' étant la puissance électrique absorbée entre les bornes du primaire. Au voisinage de la charge normale, P' est sensiblement proportionnel à P, et C peut s'écrire :

$$C = cP^2,$$

c étant une constante ; le rendement devient :

$$\text{rendement} = \frac{P}{P+F+cP^2} = \frac{1}{1+\frac{F}{P}+cP}$$

Le dénominateur de cette expression se compose d'une somme de termes, dont l'un est constant et les deux autres variables,

mais tels que leur produit est constant, $\frac{F}{P}$ $cP = Fc$. Donc le dénominateur est minimum quand ces deux termes sont égaux, c'est-à-dire quand on a : $\frac{F}{P} = cP$ ou $F = cP^2$; ou enfin

$$F = C.$$

Le rendement d'un transformateur est maximum quand les pertes dans le fer égalent les pertes dans le cuivre.

On peut mesurer le rendement en évaluant, par l'une des méthodes décrite au chapitre VIII, la puissance électrique communiquée entre les bornes du primaire et la puissance recueillie dans le circuit extérieur du secondaire.

1° *Transformateur de sous-stations.* — Si l'on travaille toujours à charge maxima, et il en est ainsi dans les sous-stations, on calcule et on construit le transformateur, d'après ce qui précède, pour que le rendement soit maximum pour la puissance maximum P_m.

On a alors : $F = c\,P_m^2$.

Pour les charges inférieures, le rendement est inférieur au rendement maximum.

2° *Transformateur d'abonné.*— Si, sur le réseau de l'alternateur, on branche un transformateur d'abonné pour servir à l'éclairage, on compte que toutes les lampes ne sont pas allumées à la fois, qu'il y en a seulement 70 °/₀ allumées simultanément ; c'est une moyenne d'expérience, car certains jours on allume plus de lampes que d'autres.

Le problème consiste alors à établir un transformateur de rendement maximum pour ce régime moyen.

Si P_o est la puissance utile nécessaire à ce régime moyen, on fait en sorte que l'on ait :

$$F = c\,P_o^2$$

Aux débuts de l'emploi des transformateurs, on ne connaissait pas cette règle et on les construisait un peu au hasard.

Voici un tableau relatif à un transformateur construit en 1885 par Ferranti. à puissance maxima de 3 kilowatts 750 entre les bornes du secondaire.

Pourcentage de la puissance maxima et du rendement.												
Puissance maxima	2.5 °/₀	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Rendement	14.6 °/₀	25.3	43.3	57.2	66.5	72.5	76.4	79.1	81.5	83	84	85.

On voit que le rendement n'est pas mauvais pour les grandes charges. mais très défectueux pour les petites. On a dans ce transformateur pour la puissance maxima :

$$F = 539^{w}, \quad C = 84^{w}; \quad \text{donc } F = 6\ C \text{ environ}$$

On est donc loin de la condition théorique de rendement maximum, $F = C$.

Pour améliorer le rendement, il faut égaliser les pertes, comme on l'a vu, et tâcher de les diminuer ainsi qu'il a été indiqué ci-dessus. On a donc changé l'enroulement du transformateur précédent, de façon à diminuer les pertes dans le fer en augmentant convenablement le nombre de spires du primaire et du secondaire.

Voici le tableau relatif à ce même transformateur rebobiné.

Pourcentage de la puissance maxima et du rendement.												
Puissance maxima	2.5 °/₀	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Rendement	28 °/₀	44.5	61.4	75.6	81.9	85.9	86.7	87	89	90.2	90.5	90.8

Le rendement est amélioré pour les grandes charges et surtout pour les petites ; on a $F = 235$, $C = 180$.

Voici un tableau relatif à deux autres transformateurs : un transformateur Westinghouse de sous-station W, de $P_m = 6$ kw,

F = 95 et C = 91 et un transformateur Ferranti d'abonné F, de P_m 15 kilow.

Pourcentage de la puissance maxima	2.5 °/₀	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
et du rendement de W	61.8 °/₀	75.9	85.7	91.9	94	95	96	96.36	96.5	96.8	96.9	96.9
et du rendement de F	62 °/₀	76	86	92.6	95	95.6	96.1	96.5	96.8	96.8	96 6	96.6

On voit d'après les tableaux ci-dessus que l'on arrive à un rendement de 97 °/₀, c'est-à-dire à une perte totale de 3 °/₀ environ. Le transformateur, quand il est bien calculé, est donc un appareil de rendement excellent et d'un usage très pratique.

134. Courants watté et déwatté. — Le courant watté est proportionnel à la somme des puissances dégagées dans le circuit extérieur du secondaire et des pertes dans le transformateur.

Le courant déwatté est constant quelle que soit la charge du secondaire, si la tension aux bornes du primaire garde une forme constante indépendante de la charge. Les raisons en sont les mêmes que celles exposées au § 104, pour démontrer la constance du courant déwatté pour aimanter le stator d'un moteur asynchrone. Le courant déwatté est en retard sur la tension et de l'ordre de la moitié ou du tiers du courant total; le décalage introduit par le transformateur se déduit de la règle des vecteurs (§ 67).

Considérons les courants wattés dans le circuit du primaire et dans le circuit extérieur qui réunit les bornes du secondaire; si on néglige les pertes dans le transformateur, on aura § 67 (3),

en désignant par v_{1e} et v_{2e} les tensions efficaces aux bornes du primaire et du secondaire, par I_{1e} et I_{2e} les intensités efficaces wattées dans le primaire et le secondaire.

$$V_{1e}\, I_{1e} = V_{2e}\, I_{2e}$$

$$\text{d'où } \frac{I_{2e}}{I_{1e}} = \frac{V_{1e}}{V_{2e}} = \frac{N_1}{N_2}$$

Les intensités efficaces wattées dans les enroulements d'un transformateur sont en raison inverse de leur nombre de spires.

on en déduit $$N_1\, I_{1e} = N_2\, I_{2e}$$

Les ampère-tours efficaces wattés du primaire et du secondaire se font équilibre.

CHAPITRE XVIII

TRANSFORMATION DU COURANT ALTERNATIF EN CONTINU PAR LES COMMUTATRICES

135. Propriétés comparées des courants continu et alternatif. — Nous venons de voir que le courant alternatif est de beaucoup préférable au courant continu pour le transport de l'énergie à distance. Mais il est incontestable que le courant continu est susceptible d'applications plus nombreuses et plus variées ; il n'y a pas d'accumulateurs ni de galvanoplastie à courant alternatif ; les moteurs à courants continus ont dans certaines applications, la traction par exemple, la supériorité sur les moteurs à courant alternatif.

Il est donc du plus haut intérêt pour le transport de l'énergie électrique de disposer d'appareils pouvant convertir à bon compte le courant alternatif en courant continu. Cette transformation se

fait par les commutatrices pour les grandes puissances et par les soupapes électrolytiques pour les puissances de quelques chevaux au maximum.

136. Groupe moteur générateur. — La solution rationnelle qui se présente pour convertir un courant alternatif en courant continu, consiste à prendre un moteur à courant alternatif et à le manchonner avec un générateur à courant continu. On fait tourner le moteur avec du courant alternatif et on recueille dans le générateur un courant continu.

Cette solution n'est pas la plus économique ; on aura de meilleurs résultats, à ce dernier point de vue, en produisant le courant continu dans le même induit qui reçoit le courant alternatif.

Cette seconde solution est fournie par les *commutatrices*.

137. Étude de l'anneau Gramme. — Reprenons l'anneau Gramme (§ 73), et enroulons régulièrement sur l'armature une bobine de fil formant un circuit fermé (fig. 52).

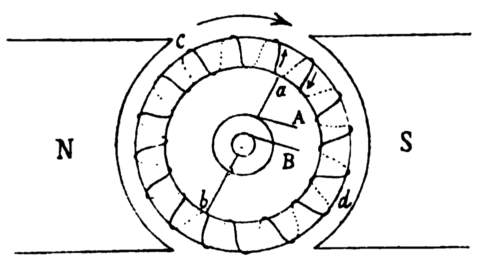


Fig. 52.

Réunissons respectivement à deux bagues conductrices isolées sur l'arbre deux points diamétralement opposés de l'induit, *a*, *b*. Ces points divisent la bobine en deux demi-anneaux identiques, tels que, si pour l'un d'eux le courant est centripète dans la portion de spire que l'on voit en regardant l'induit d'un côté de l'axe, le courant est centrifuge pour l'autre (fig. 52).

La force électromotrice induite dans un des demi-anneaux est à chaque instant égale et de signe contraire à la force électromotrice

induite dans l'autre ; en effet, les lignes de force étant symétriques par rapport à l'axe de l'induit, l'un des demi-anneaux *a d b* coupe le même flux avec la même vitesse que l'autre demi-anneau *a c b*, mais en sens contraire.

Il est facile de voir cependant que ces deux demi-anneaux exercent une action concordante dans un circuit extérieur qui réunit les bagues collectrices.

Considérons, en effet, l'un des points de séparation des deux demi-anneaux, le point *a* par exemple ; si le demi-anneau de gauche existait seul, il fournirait un courant centrifuge par exemple dans la portion de spire induite vue sur la figure, allant par conséquent de B en A dans le circuit extérieur ; si le demi-anneau de droite existait seul, il fournirait un courant centripète pour la portion de spire vue sur le dessin, mais centrifuge pour la portion postérieure de cette spire qui vient se réunir au demi-anneau de gauche.

Le courant engendré par le demi-anneau de droite circulerait donc lui aussi de B vers A dans le circuit extérieur.

Au point *b* diamétralement opposé, les deux demi-anneaux donnent des courants qui s'approchent tous deux du point *b* et par conséquent dirigés de B vers A dans le circuit extérieur.

Les deux demi-anneaux agissent d'une façon concordante, pour faire circuler à chaque instant des courants de même sens dans le circuit extérieur ; ils se comportent comme deux piles identiques C et D réunies par leurs pôles de même nom et débitant dans le circuit extérieur A B (fig. 53).

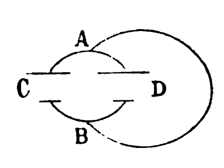


Fig. 53.

Pendant une demi-période, les piles auraient une force électromotrice variable et leurs pôles ne changeraient pas de signe ; pendant la demi-période suivante, les pôles positifs deviendraient négatifs et inversement.

La *force électromotrice de la machine est la force électromotrice d'un demi-anneau* ; elle varie d'un instant à l'autre ; elle est maxima quand le diamètre de prise de courant passe sur la ligne neutre, nulle quand il passe sur la ligne perpendiculaire à la ligne neutre, positive ou négative suivant que le point a est au-dessus ou au-dessous du diamètre pp' perpendiculaire à la ligne neutre (§ 73).

La tension aux bornes du circuit extérieur est donnée par la relation

$$v = r\,i - e$$

r étant la résistance d'un demi-anneau, i le courant qui y circule, e la force électromotrice totale induite ; i et e étant toutes deux des fonctions périodiques de même période, la tension l'est aussi ; de plus si l'on peut négliger le terme $r\,i$ devant la force électromotrice e, on a :

$$v = -e$$

La tension est périodique comme la force électromotrice et sa valeur dépend de la position du diamètre de prise de courant.

138. Induit générateur de courant continu. — Si, par un artifice, on s'arrange pour que le diamètre de prise de courant reste invariable par rapport à l'inducteur, la force électromotrice est alors constante.

On y arrive par l'intermédiaire du *Collecteur*. Le collecteur est un cylindre isolé, fixé et tourné sur l'arbre de l'induit. Il est formé de lames de cuivre isolées entre elles, régulièrement disposées sur la surface latérale du cylindre ; les côtés les plus longs de ces lames étant dirigés suivant les génératrices du cylindre (fig. 54).

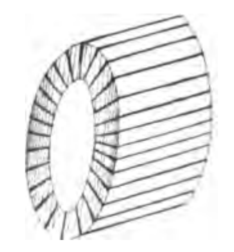


Fig. 54.

Considérons l'induit avec son collecteur ; on divise la bobine enroulée sur l'induit en sections égales comprenant chacune le même nombre de spires, le nombre de ces sections étant égal à celui des lames du collecteur (fig. 55).

Supposons pour fixer les idées qu'il y ait autant de spires que de lames ; on réunit le point le plus voisin de chaque spire à la lame la plus voisine.

Deux balais bons conducteurs, ordinairement en charbon, sont disposés invariables dans l'espace et s'appuient sur les lames du collecteur aux deux extrémités d'un même diamètre ; ils sont réunis métalliquement avec les bornes A et B d'un circuit extérieur.

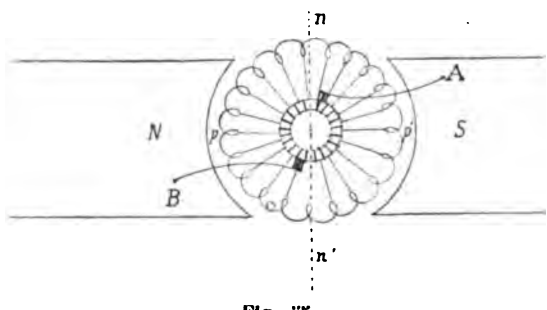


Fig. 55.

Le courant est engendré dans les deux demi-anneaux séparés par le diamètre des points de contact des lames du collecteur avec les balais.

Chaque lame étant isolée ne joue de rôle actif qu'autant qu'elle passe sous un balai. Supposons le balai d'épaisseur infiniment petite.

Aussi longtemps qu'une lame est en contact avec un balai, le point de l'induit qui communique avec cette lame est un point de séparation des demi-anneaux générateurs.

Pendant le contact d'une lame avec le balai, le diamètre de prise de courant oscille d'un angle très-petit dont les côtés s'appuient sur les bords de la lame et le sommet, sur l'axe de l'induit. Lorsque cette lame quitte le balai, elle ne joue plus aucun rôle ; c'est la lame suivante qui la remplace sous le balai, qui joue le rôle actif de prise de courant, de sorte que le diamètre de prise de courant reste toujours sensiblement invariable dans l'espace. Les spires de chaque demi-anneau générateur sont toujours comprises dans

la même région de l'espace et coupent toujours le même flux ; elles sont donc le siège de forces électromotrices sensiblement constantes [1].

La tension aux bornes entre les balais est donnée à chaque instant par la formule :

$$v = ri - e$$

Si l'on peut négliger ri devant e, on a :

$$v = -e,$$

la tension est constante comme la force électromotrice [2].

139. Commutatrice. — Supposons maintenant que l'anneau Gramme porte sur son axe d'un côté deux bagues réunies à deux points diamétralement opposés de l'induit et de l'autre côté un collecteur et deux balais, ceux-ci fixes dans l'espace s'appuyant sur deux lames diamétralement opposées. Si l'on réunit les deux bagues collectrices aux extrémités d'un circuit extérieur, l'anneau Gramme y débitera un courant alternatif ; si l'on réunit les balais du collecteur aux deux extrémités d'un second circuit extérieur, l'anneau Gramme y débitera un courant continu.

Si les deux circuits extérieurs sont fermés simultanément, d'un côté la machine débitera un courant alternatif et de l'autre côté un courant continu. Mais la tension aux bornes du collecteur ne sera plus aussi constante. En effet l'induit fournissant un courant alternatif sera le siège d'un courant d'intensité variable et la force électromotrice totale de la machine e se composera de deux termes, l'un dû au flux inducteur coupé par les spires de chacun des demi-anneaux donnant une force électromotrice constante E et l'autre dû à la variation du flux propre de l'induit par suite de la

(1) Il y aura des oscillations de la force électromotrice dues aux oscillations du diamètre de prise de courant.

(2) La planche III représente une dynamo génératrice de courant continu.

variation du courant dans l'induit, créant une force électromotrice alternative Ep dont la valeur maxima est toujours notablement plus faible que celle de la première ; de sorte que la force électromotrice résultante gardera toujours le même signe, mais présentera des ondulations plus ou moins prononcées dont la période sera égale à la période du courant alternatif débité par l'induit.

On peut se servir de ce courant légèrement ondulé comme courant inducteur des électro-aimants de l'alternateur.

Au lieu de faire fonctionner l'alternateur comme générateur, on peut le faire fonctionner comme moteur synchrone, en amenant à l'induit un courant alternatif par les bagues collectrices ; du côté du collecteur, la tension entre les balais aura toujours un signe constant, mais sera légèrement ondulée pour les mêmes raisons que celles qui viennent d'être exposées pour le générateur. Le circuit extérieur qui réunit les balais sera le siège d'un courant continu ondulé. Le moteur synchrone muni d'un collecteur *convertit donc le courant alternatif qu'on lui fournit en un courant continu*; c'est une commutatrice.

Un défaut des commutatrices est d'abord que le courant qu'elles fournissent présente des ondulations plus ou moins prononcées ; en outre, les commutatrices, étant avant tout des moteurs synchrones, en présentent aussi tous les inconvénients ; en particulier lorsque le courant continu débité du côté collecteur devient trop grand, le moteur synchrone se décroche et la commutatrice cesse alors de fonctionner.

La conversion des courants alternatifs polyphasés en courant continu peut se faire de la même façon, et donne lieu à des inconvénients de même ordre quoique moins accentués.

Le rendement atteint 93 °/₀ pour les grandes machines.

140. Dynamo à champ tournant. — On peut faire disparaître tous les défauts inhérents aux commutatrices, par l'emploi des convertisseurs à champ tournant.

Reprenons l'anneau Gramme avec son collecteur tournant entre les pôles inducteurs, et deux balais fixés *sur les inducteurs* frottant sur deux lames diamétralement opposées du collecteur.

Supposons la machine fixée sur un bâti ; l'induit tourne avec une vitesse constante N par rapport aux inducteurs, dans le sens des aiguilles d'une montre par exemple. Si l'on fait tourner le bâti tout entier avec une vitesse N' quelconque, le courant débité par la machine n'en sera pas influencé ; il est indépendant de la vitesse avec laquelle tourne le bâti ; les phénomènes d'induction ne dépendent que du mouvement relatif.

Lorsque le bâti tournera autour de l'axe de l'induit avec la même vitesse angulaire N inverse de celle de l'induit, c'est-à-dire en sens inverse des aiguilles d'une montre, l'induit animé de deux vitesses égales et de sens contraire sera en réalité fixe dans l'espace, et les inducteurs tourneront avec les balais par rapport à l'observateur, avec une vitesse constante N en sens inverse des aiguilles d'une montre.

Pour la production du courant continu, il revient donc au même de faire tourner l'induit dans un champ inducteur fixe avec des balais fixes, que de laisser l'induit fixe et de faire tourner les inducteurs et les balais en sens inverse avec la même vitesse.

141. Convertisseur à champ tournant Leblanc. — La force électromotrice d'induction dépend du flux dans lequel se déplace l'induit, mais nullement de l'origine de ce flux.

Prenons donc un stator de moteur d'induction, et remplaçons le rotor par un induit bobiné en anneau avec son collecteur.

Alimentons le stator par des courants polyphasés de façon à

produire un champ tournant ; si sur deux lames diamétralement opposées frottent deux balais tournant dans le même sens et avec la même vitesse que le champ, nous réalisons la dynamo à flux tournant de tout à l'heure ; nous convertissons les courants polyphasés du stator en courant continu.

Ce courant continu est celui que fournirait une dynamo ordinaire à induit fixe et inducteurs tournants ; les ondulations de période égale à celle des courants alternatifs qui alimentent le convertisseur sont atténuées.

Pour réaliser pratiquement le convertisseur, il suffira de faire tourner les balais à la même vitesse que le champ, à l'aide d'un petit moteur synchrone (Chapitre XIV). La position des balais réglée une fois pour toutes restera toujours réglée, il ne peut pas y avoir de décrochage.

CHAPITRE XIX

TRANSFORMATION DU COURANT ALTERNATIF EN COURANT ONDULÉ PAR LES SOUPAPES ÉLECTROLYTIQUES

142. Historique. — En 1857, Buff découvrait le fait curieux suivant :

Si l'on fait l'électrolyse de l'eau dans un voltamètre dont les électrodes sont l'une en aluminium et l'autre en un autre métal, du plomb ou du platine par exemple, si l'aluminium est cathode ou électrode négative, on constate que le courant passe bien à travers

le voltamètre (fig. 56), mais si l'on inverse le sens du courant c'est-à-dire si la plaque d'aluminium est prise comme anode, le courant ne passe plus ou du moins il est considérablement amoindri.

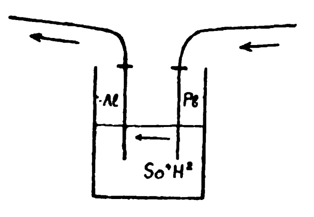


Fig. 56.

Le voltamètre se laisse donc traverser par le courant qui passe du plomb à l'aluminium, et il arrête celui qui passe en sens inverse. Le voltamètre dont une électrode est en aluminium joue, par rapport à un courant électrique, le rôle d'une soupape ou d'un clapet dans une conduite d'eau ; il ferme le passage au courant qui arrive dans un sens et il l'ouvre à celui qui arrive en sens opposé.

C'est pour cette raison que l'on appelle cet appareil, *clapet* ou *soupape électrolytique.*

La soupape électrolytique de Buff fonctionne régulièrement, lorsque la tension s'exerçant entre les électrodes est inférieure à 20 volts ; mais pour une tension supérieure, le clapet perd sa propriété et laisse passer le courant dans les deux sens.

Cette découverte de Buff était restée longtemps dans l'ombre. M. Pollak l'a remise à l'ordre du jour et a montré qu'en remplaçant l'eau acidulée par un phosphate alcalin, le phosphate d'ammonium par exemple, on peut reculer jusqu'à 140 volts et même 200 volts la limite de la tension au-dessus de laquelle la soupape cesse de fonctionner.

Pour les voltages industriels de 110 volts, le clapet à phosphate d'ammonium joue bien son rôle de soupape électrolytique.

143. Principe du fonctionnement. — Voyons ce qui se passe dans un tel voltamètre.

Le phosphate est décomposé · l'ammonium Az H^4 se porte sur

l'électrode négative et le radical PO^4 sur l'électrode positive ; si l'électrode positive est le plomb, c'est-à-dire si le courant arrive par le plomb, l'ammonium se porte sur l'aluminium (cathode) et le radical sur le plomb ; il ne se produit que des corps bons conducteurs.

Quand on renverse le courant, c'est-à-dire quand on le fait arriver par l'aluminium, l'ammonium se porte sur le plomb (cathode) et le radical sur l'aluminium (anode) ; il se forme alors du phosphate d'alumine qui étant mauvais conducteur de l'électricité réduit considérablement le courant, au point de le supprimer pratiquement, si la tension n'est pas trop grande.

Il est aisé de montrer ce phénomène en intercalant sur une distribution de 110 volts en courant continu une lampe à incandescence en série avec un clapet ; si le pôle positif de la distribution communique avec le plomb du clapet, la lampe brille d'un vif éclat comme si elle était branchée directement ; mais si c'est le pôle négatif qui communique avec le plomb, la lampe s'éteint.

La formation d'un clapet demande un temps très court, quelques minutes ; cette formation s'obtient en faisant passer le courant alternativement plusieurs fois dans un sens et dans l'autre.

144. Clapet de M. Nodon. — M. Nodon a donné au clapet la forme suivante :

« Chaque voltamètre se compose :

» 1° D'un tube en fer perforé et fermé à sa partie inférieure par » un bouchon isolant ; ce tube est muni d'une prise de courant.

» 2° D'un cylindre formé d'un alliage de zinc et d'aluminium. » Ce cylindre pénètre dans le bouchon et est concentrique au » tube de fer ; il est muni aussi d'une prise de courant. Le tout » est introduit dans un récipient cylindrique renfermant une solu- » tion saturée de phosphate d'ammonium.

» Les actions électrolytiques qui se produisent sont les suivantes : lorsque le courant arrive sens positif du cylindre vers » le tube, il se forme instantanément à la surface du cylindre une » pellicule de phosphate d'aluminium et d'oxyde de zinc, qui présente une résistance énorme et s'oppose par suite au passage du » courant.

» Au contraire, si le courant arrive sens positif du tube vers » le cylindre, il y a réduction de la pellicule et le courant circule librement.

145. Conversion du courant alternatif en courant intermittent. — Le clapet électrolytique est employé pour transformer un courant alternatif en courant de sens constant.

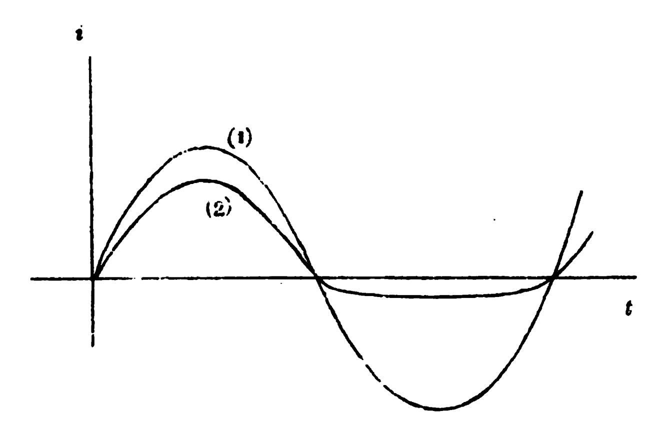


Fig. 57.

Joignons les électrodes d'un clapet aux bornes d'un alternateur ; pendant une demi-période, l'aluminium est électrode négative et le courant passe ; pendant la demi-période suivante il est électrode positive et le courant ne passe pas.

Sans clapet le courant est représenté par la courbe (1), avec le clapet il est représenté par la courbe (2) (fig. 57).

Dans la demi-période où le courant passe, les ordonnées sont

réduites à cause de la résistance et de la force contre-électromotrice du voltamètre ; dans la demi-période suivante, si l'on néglige le petit courant de fuite du clapet, le courant est pratiquement nul.

Le clapet laisse passer un courant *intermittent de sens constant* dont les ondulations se succèdent à une demi-période d'intervalle.

La soupape ainsi utilisée ne donne donc qu'une solution incomplète : le courant alternatif n'est transformé que pendant la moitié d'une période ; il reste inutilisé pendant l'autre moitié.

Il y avait lieu de chercher une amélioration permettant d'utiliser toutes les alternances du générateur.

La solution de ce problème est donnée par le dispositif suivant.

146. Conversion du courant alternatif en courant ondulé. — Considérons un pont de Wheatstone, sur chacune des branches duquel on place un clapet électrolytique orienté comme l'indique la figure 58.

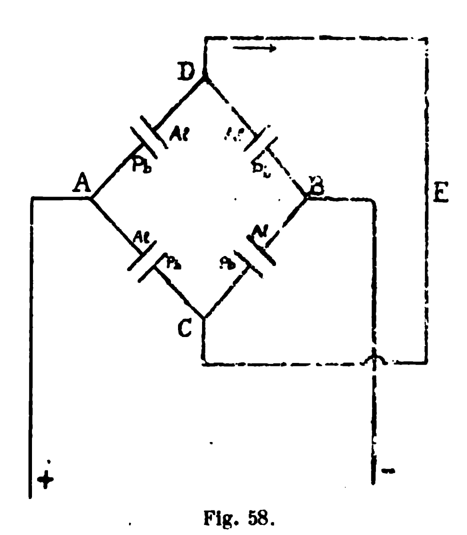


Fig. 58.

Branchons l'alternateur entre les sommets A et B et réunissons, par un circuit récepteur quelconque, les sommets C et D ; il est facile de voir que la branche D E C est traversée par un courant redressé, c'est-à-dire toujours dans le même sens.

Considérons en effet la demi-période pendant laquelle le courant de l'alternateur s'approche de A et s'éloigne de B (fig. 58) ; le courant devant aller de A à B, quatre circuits se présentent devant

lui, A D E C B, A C E D B. A D B et A C B; pour le premier les clapets ont l'aluminium pour cathode; les autres ont au moins un clapet avec l'aluminium comme anode; le courant passe donc par le premier chemin et ne passe pas par les autres.

Pendant la demi-période suivante B devient le pôle positif et A le pôle négatif ; le courant pour aller de B à A trouve encore quatre chemins devant lui, B D E C A, B C E D A, B D A et B C A; pour la même raison que dans le cas précédent il choisit le premier à l'exclusion des autres.

Il résulte de là que la branche D E C est parcourue par le courant constamment dans le même sens, le sens D C.

On a, par cet artifice, transformé le courant alternatif en courant *ondulé* de sens constant dans la branche D E C.

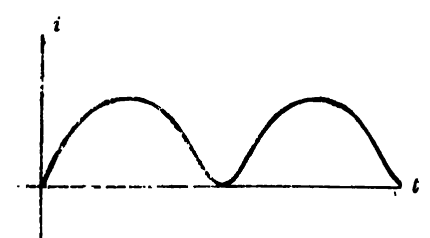


Fig. 59.

Le courant de cette branche est alors représenté par la fig. 59. Le dispositif de quatre clapets Nodon, disposés en pont de Weatstone, porte plus particulièrement le nom de soupape Nodon. Les électrolyseurs peuvent supporter une tension variant de 50 à 140 volts ; une soupape redresse un courant alternatif dont la force électromotrice ne dépasse pas 140 volts. Pour les tensions supérieures, on monte plusieurs soupapes en tension, suivant la valeur de la force électromotrice maximum.

Le rendement de cet appareil est de 60 à 75 °/₀. Ce rendement n'est pas très grand, mais comme l'appareil coûte peu cher, il est pratique pour les petites puissances.

147. Usages de la soupape Nodon. — Le dispositif décrit est très précieux dans beaucoup de cas et en particulier

pour charger des accumulateurs au moyen d'un courant alternatif, par exemple les accumulateurs d'une voiture automobile électrique.

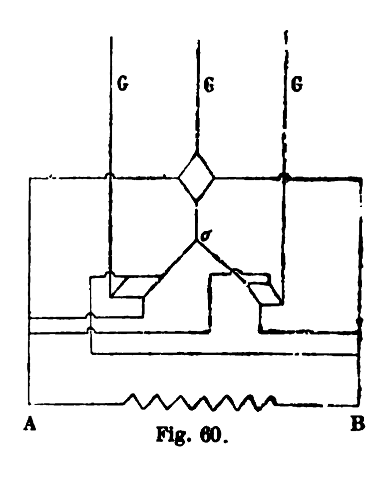


Fig. 60.

Si l'on veut n'utiliser qu'une demi-phase du courant, on n'emploie qu'un seul electrolyseur au lieu de quatre, et l'appareil joue alors le rôle d'interrupteur ou de disjoncteur alternatif.

Une application importante de la soupape Nodon consisterait dans l'excitation des alternateurs ; le courant alternatif redressé par la soupape Nodon ne donnerait qu'une solution peu satisfaisante en courant alternatif monophasé ; mais la solution est meilleure en courant polyphasé.

Dans le cas du triphasé, trois soupapes Nodon seraient disposées en étoile ou en triangle suivant le schéma de la fig. 60, les courants redressés par chaque soupape passent dans le conducteur et donnent naissance dans le conducteur A B à un courant continu ondulé somme des trois courants triphasés redressés (fig. 61). Les ondulations du courant sont d'autant moins prononcées que le courant est polyphasé d'ordre plus grand.

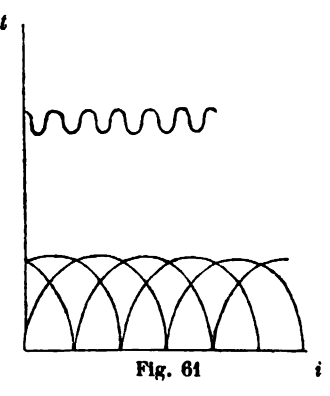


Fig. 61

148. Soupape Hewitt-Cooper. — Elle est fondée sur le principe suivant : Dans un ballon vide est encastrée à la partie supérieure une tige de fer et à la partie inférieure se trouve du mercure (fig. 62) ; par une disposition spéciale on fait jaillir une

étincelle entre le mercure et le fer ; il en résulte des vapeurs de mercure qui se répandent dans le ballon et l'appareil est alors amorcé. Un courant quelconque peut passer du fer vers le mercure, mais l'appareil arrête tout courant de sens inverse, c'est-à-dire allant du mercure vers le fer, et cela même sous une tension de 1000 volts.

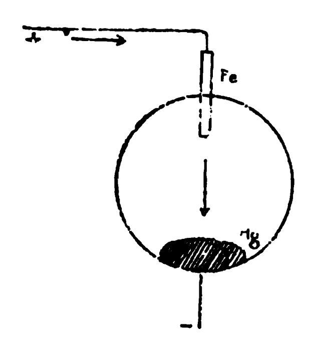


Fig. 62.

Cet appareil est donc une véritable soupape. Son rendement serait de 98 %, sous une tension de 1000 volts.

Avec cette simplicité d'appareil et de fonctionnement et ce rendement merveilleux, cette invention promet un nouvel essor à l'industrie électrique ; les transports de force à grande distance prendront un développement de plus en plus intense et se prêteront aux applications les plus variées.

TABLE DES MATIÈRES

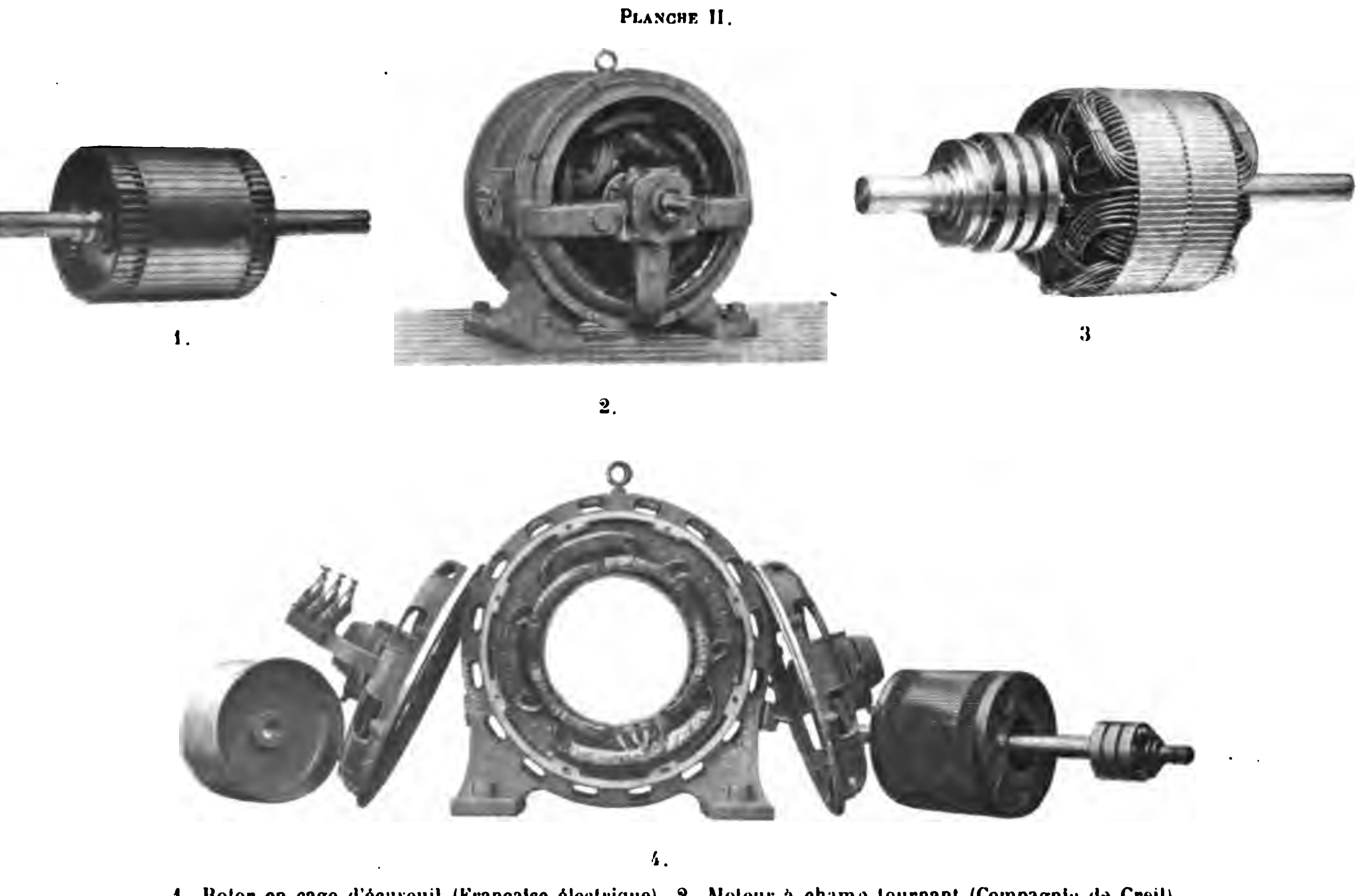
Troisième Partie. — ALTERNATEURS ET MOTEURS

QUATRIÈME PARTIE. — TRANSFORMATEURS ET CONVERTISSEURS

LILLE. — IMPRIMERIE LE BIGOT FRÈRES

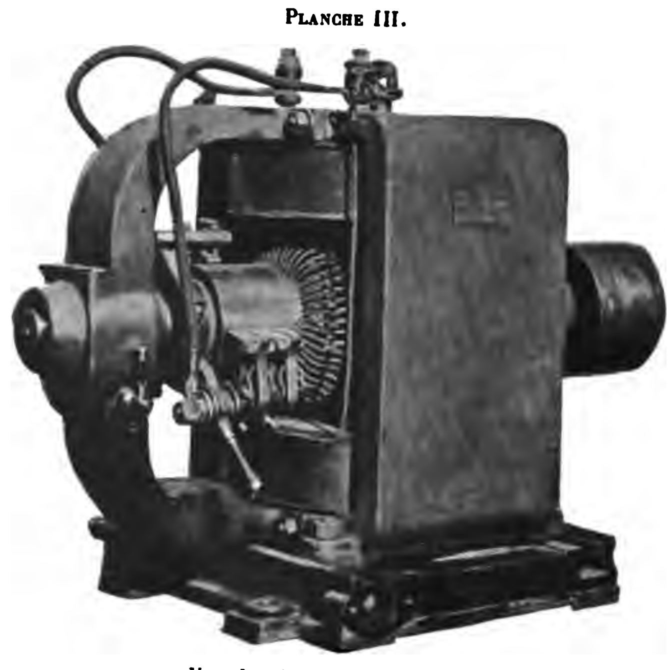
Alternateur de la Société « Électricité et Hydraulique » avec sa dynamo excitatrice sur l'arbre

PLANCHE II.



1. Rotor en cage d'écureuil (Française électrique). 2. Moteur à champ tournant (Compagnie de Creil).
3. Rotor bobiné avec bagues (Française électrique). 4. Moteur à champ tournant démonté (Schneider Creusot).

Planche III.



Vue du côté collecteur d'une
Dynamo à courant continu bipolaire (Compagnie de Creil)


Digitized by Google

